

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Student:
Matej Dominković

U Zagrebu, ožujak 2014.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Prof. dr.sc. Zoran Lulić

Student:
Matej Dominković

U Zagrebu, ožujak 2014.

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradilo samostalno uz potrebne konzultacije, savjete i uporabu navedene literature.

Posebno se zahvaljujem prof. dr. sc Zoranu Luliću i asistentu dr. sc. Goranu Šagiju na pomoći i savjetima.

Matej Dominković

Sadržaj

Popis slika	III
Popis tablica	VI
Popis oznaka	VII
Sažetak	X
1. Uvod	1
1.1. Discipline natjecanja.....	1
1.2. Izvadak iz pravilnika (2014 Formula SAE Rules).....	3
1.2.1. Dio pravilnika(2014 Formula SAE Rules)	4
2. Pozicioniranje amortizera.....	13
3. Prijenosni omjer potisne poluge.....	15
3.1. Utjecaj prijenosnog omjera.....	16
3.2. Poluga (engl. rocker).....	18
3.2.1. Izračun prijenosnog omjera prednje poluge.....	22
3.2.2. Izračun prijenosnog omjera stražnje poluge	25
4. Definiranje karakteristike opruge svedene na kotač	27
5. Određivanje karakteristike amortizera	29
5.1. Karakteristika amortizera na kotaču	34
6. Opužna karakteristika ovjesa	36
6.1. Prebacivanje opužne karakteristike sustava ovjesa (engl. Ride rate) na centar kotača	42
7. Izračun odgovarajuće karakteristike amortizera	44
8. Definiranje vozila FSB Arctos u programu Lotus	50
8.1. Kinematika ovjesa.....	52
9. Definiranje vozila u programu CarSIM	55
9.1. Kompletno vozilo (engl. Vehicle body)	56
9.2. Pogon i prijenos snage (engl. Powertrain)	58
9.2.1. Kočnice(engl. Brake system (4 wheel system)).....	60
9.2.2. Gume.....	61
9.3. Upravljanje.....	62
9.4. Kinematika kotača	64
10. Usporedba rezultata simulacije.....	66
10.1. Ispitna staza osmica	67
10.2. Simulacija ubrzanja i usporenja.....	72

10.3. Ispitna staza Autokros.....	74
11. Zaključak	78
12. Literatura.....	79
PRILOG	80

Popis slika

Slika 1. Poligon testa bočnog ubrzanja	2
Slika 2. Pojednostavljeni vibracijski model četvrtine vozila	13
Slika 3. Prikaz položaj amortizera i opruge kako je konstruirano na stvarnom modelu FSB Arctos.....	14
Slika 4. Poluga bolid FSB Arctos	18
Slika 5. Skica poluge sa pripadajućim brzinama i njihovim kutovima (a); Dijagram brzina (b) [2]	19
Slika 6. Kutovi ulaznih i izlaznih brzina poluge prednjeg kotača	22
Slika 7. Promjena iznosa prijenosnog omjera poluge u ovisnosti o zakretu poluge.....	23
Slika 8. Kutovi ulaznih i izlaznih brzina poluge prednjeg kotača	25
Slika 9. Promjena iznosa prijenosnog omjera poluge u ovisnosti o zakretu poluge.....	26
Slika 10. Karakteristika opruge u ovisnosti o pomaku i sili na kotaču.....	27
Slika 11. Karakteristika opruge na prednjem kotaču dobivena iz dijagram na slici 10..	27
Slika 12. Karakteristika opruge na stražnjem kotaču.....	28
Slika 13. Tri vrste amortizera sa prikazom karakteristikom u dijagramu sila/hod klipa (lijevo), sila/brzina kretanja klipa (desno)[3]	29
Slika 14. Karakteristika amortizera snimljena na ispitnom stolu, na apscisi je označen hod amortizera ± 10 mm, a na ordinati iznos sile u [N] [4].....	30
Slika 15. Princip rada uređaja za testiranje karakteristike amortizera	31
Slika 16. Prikaz elemenata dijagram dobivenog ispitivanjem amortizera na ispitnom uređaju	31
Slika 17. Karakteristika amortizera u dijagramu ovisnosti brzine kretanja klipa o sili ..	32
Slika 18. Prikaz karakteristike kvalitetno izrađenog amortizera	33
Slika 19. Srednja vrijednost krivulje karakteristike amortizera.....	33
Slika 20. Prikazana karakteristika prednjeg i stražnjeg amortizera (plavo) i njihova odgovarajuća karakteristika u ravni kotača	35
Slika 21. Osnovne dimenzije vozila.....	37
Slika 22. Bočni prikaz vozila i dimenzije odgovarajućih značajki	38
Slika 23. Dijagram ovisnosti omjera amplitude ovješen mase i pobude amplitude sustava (faktora povećanja) i omjera frekvencija ω/ω_0 [7]	46
Slika 24. Preporučene vrijednosti relativnog koeficijenta prigušenja kao i omjera koeficijenta prigušenja kompresije i ekspanzije [7].	47
Slika 25. Ulazni podaci vozila FSB Arctos za izračun koeficijenata prigušenja.	47
Slika 26. Sučelje programa gdje su prikazani iznosi koeficijenata kritičnog prigušenja (žute kućice) kao i vrijednosti relativnog koeficijenta prigušenja odbrani prema preporuci [2] (bijeli kvadrati).	48
Slika 27. Koeficijenti prigušenja izračunati za bolid FSB Arctos	48

Slika 28. Karakteristika prepravljenog prednjeg amortizera pozicioniranog u ravni kotača za vozilo FSB Arctos.....	49
Slika 29. Karakteristika novog stražnjeg amortizera pozicioniranog u ravni kotača za vozilo FSB Arctos.....	49
Slika 30. Model vozila FSAE Arctos u programskom paketu za slismuliranje kinematike vozila „Lotus“	50
Slika 31. Promjena nagiba uzdužne osi kotača za prednju i stražnju osovinu.....	52
Slika 32. Promjena međuosovinskog razmaka	52
Slika 33. Promjena bočnog nagiba uslijed hoda kotača.....	53
Slika 34. Promjena nagiba uslijed hod kotača	53
Slika 35. Promjena konvergencije/divergencije uslijed hoda kotača.....	54
Slika 36. Glavno sučelje programa CarSim	55
Slika 37. Pod sučelje modela za definiranje dodatnih opterećenja.....	56
Slika 38. Glavno sučelje za definiranje vozila.....	56
Slika 39. Vaganje bolida FSB Arctos u svrhu određivanja položaja težišta.....	57
Slika 40. Prikaz sučelja za definiranje mase i centra gravitacije vozila kao i pripadajućih momenata inercije oko odgovarajućih osi	57
Slika 41. Definiranje pogona i prijenosa snage	58
Slika 42. Mapa motora.....	59
Slika 43. Izbornik za definiranje prijenosne kutije	59
Slika 44. Izbornik kočionog sustava	60
Slika 45. Izbornik za definiranje pneumatika	61
Slika 46. Izbornik za definiranje promjene polumjera kotača uslijed opterećenja	61
Slika 47. Izbornik za definiranje statičkih karakteristika geometrije kotača	62
Slika 48. Prikaz definiranja statičkih karakteristika kotača kao i pravilni predznaci u programu CarSim.....	63
Slika 49. Definiranje predznaka prilikom zikretanja kotača u ovisnosti o pomaku letve volana.....	63
Slika 50. Izbornik za definiranje kinematike kotača.....	64
-promjena usmjerenosti kotača kotača- vertikalnim hodom prema gore se povećava, dok hodom prema dolje smanjuje.....	65
Slika 51. Prikaz potrebnih karkterstika ovjesa te odgovarajućih predznaka	65
Slika 52. Hod opruge	67
Slika 53. Djelovanje sile na prednje amortizere prepravljenog i postojećeg modela	68
Slika 54. Djelovanje sile na stražnje amortizere prepravljenog i postojećeg modela.....	69
Slika 55. Bočno ubrzanje na ispitnoj stazi „osmice“	69
Slika 56. Naginganje vozila oko poprečne osi (poniranje i propinjanje).....	70

Slika 57. Bočno naginjanje vozila	70
Slika 58. Usporedba bočnog naginjanja za model Arcsto 3.0 sa i bez stabilizatora.....	71
Slika 59. Sila djelovanja za prednji amortizer	72
Slika 60. Sila djelovanja za stražnji amortizer.....	73
Slika 61. Hod opruge za vrijeme testa ubrzanja i kočenja	73
Slika 62. Autokros staza	74
Slika 63. Bočno ubrzanje vozila za ispitnu proceduru autokros.....	74
Slika 64. Uvećani prikaz bočnog ubrzanja prikazanih kvadratima „a“(lijevo) i „b“(desno) sa slike 62.	75
Slika 65. Uvećani prikaz bočnog ubrzanja prikazan kvadratom „c“ sa slike 62.	75
Slika 66. Naginjanje vozila oko poprečne osi (poniranje i propinjanje) (engl. pitch)	76
Slika 67. Bočno naginjanje vozila	76
Slika 68. Hod opruge za ispitnu proceduru autokros	77

Popis tablica

Tablica 1. Proces iteriranja opružne karakteristike sustav ovjesa (engl. Ride rate)	41
Tablica 2. Vanjske dimenzije modela vozila	50
Tablica 3. Karakteristika ovjesa.....	51
Tablica 4. Karakteristika mase, inercije i statičkog poravnanja	52
Tablica 5. Statičke karakteristike geometrije kotača	62

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	udaljenost težišta od prednje osovine
a_α	g	bočno ubrzanje vozila
b	mm	udaljenost težišta od stražnje osovine
C_1	Ns/m	koeficijent prigušenja
$C_{k,p}$	Ns/m	kritični koeficijent prigušenja prednje ovješene mase
$C_{k,p.no}$	Ns/m	kritični koeficijent prigušenja za prednju neovješenu masu
C_R	Ns/m	koeficijent prigušenja za ekspanziju amortizera
C_W	Ns/m	koeficijent prigušenja u ravnini kotača
c/r	-	omjer koeficijenta prigušenja kompresije i ekspanzije amortizera
F_D	N	sila djelovanja na amortizer
F_W	N	vertikalna sila na kotaču
f_R		faktor stope rasta prijenosnog omjera
H	mm	vertikalna udaljenost težišta od osi valjana
h	mm	visina težišta od tla
K_W	N/mm	karakteristika opruge između centra kotača i šasije
K_{WF}	N/mm	karakteristika prednje opruge između centra kotača i šasije
K_{WR}	N/mm	karakteristika stražnje opruge između centra kotača i šasije
K_S	N/mm	Konstanta opruge
$K_{\phi F}$	N/mm	karakteristika bočnog naginjanja prednje osovine (engl. <i>Roll rate</i>)
$K_{\phi R}$	N/mm	karakteristika bočnog naginjanja stražnje osovine (engl. <i>Roll rate</i>)
K_{RF}	N/mm	prednja opružna karakteristika sustava ovjesa (engl. <i>Ride rate</i>)
K_{RR}	N/mm	stražnja opružna karakteristike sustava ovjesa (engl. <i>Ride rate</i>)
K_T	N/mm	Konstanta opruge gume
l_1	mm	dužina kraka poluge
l_2	mm	dužina kraka poluge
l_F	mm	trag kotača prednje osovine
l_R	mm	trag kotača stražnje osovine
l	mm	međuosovinski razmak
m_v	kg	ukupna masa vozila

$m_{p,no}$	kg	prednja neovješena masa po kotaču
$m_{s,no}$	kg	stražnja neovješena masa po kotaču
MR_p	-	prednji omjer hoda opruge i kotača
MR_s	-	stražnji omjer hoda opruge i kotača
MR	-	ukupni prijenosni omjer sustava ovjesa
$R_{D/S}$	-	prijenosni omjer ovjesa (omjer hoda amortizera u odnosu na hod kotača)
R_D	-	skraćeni zapis prijenosnog omjera ovjesa
R_S	-	prijenosni omjer potisne šipke (engl. <i>pushrod</i>)
R_{RL}	-	faktor prijenosnog omjera dužina krakova poluge
$R_{R\psi}$	-	faktor prijenosnog omjera ulaznog i izlaznog kuta brzina
r	mm	polumjer radilice ispitnog uređaja za amortizere
S_{uk}	N/mm	ukupna karakteristika opruga serijskog spoja
S_1	N/mm	karakteristika prve opruge serijskog spoja
S_2	N/mm	karakteristika druge opruge serijskog spoja
v_D	m/s	brzina kretanja klipa amortizera
v_S	m/s	vertikalna brzina kretanja kotača
v_P	m/s	brzina kretanja potisne šipke (engl. <i>pushrod</i>)
W_1	N	težina na prednjem lijevom kotaču
W_2	N	težina na prednjem desnom kotaču
W_3	N	težina na stražnjem lijevom kotaču
W_4	N	težina na stražnjem desnom kotaču
W_F	N	ukupna težina prednje osovine
W_R	N	ukupna težina stražnje osovine
W_{FO}	N	težina prenesena na prednji vanjski kotač prilikom prolaska kroz zavoj
W_{FI}	N	težina prenesena na prednji unutarnji kotač prilikom prolaska kroz zavoj
W_{RO}	N	težina prenesena na stražnji vanjski kotač prilikom prolaska kroz zavoj
W_{RI}	N	težina prenesena na stražnji unutarnji kotač prilikom prolaska kroz zavoj
x	mm	udaljenost prihvata klipnjače od centra radilice
z_{RF}	mm	visina prednjeg centra valjanja
z_{RR}	mm	visina stražnjeg centra valjanja
δz_D	-	infinitezimalni promjena hoda amortizera

δz_S	-	infinitesimalna promjena hoda kotača
δz_P	-	infinitesimalni pomak potisne šipke
θ_{RD}	°	kut otklona između ulazne i izlazne brzine
ϕ_R	°	kut otklona između krakova poluge
ψ_{Z1}	°	početni kut ulazne brzine
ψ_{Z2}	°	početni kut izlazne brzine
ψ_1	°	kut ulazne brzine
ψ_2	°	kut izlazne brzine
ω_R	s-1	kutna brzina poluge
ϕ/a_α	deg/g	gradijent bočnog nagnjanja
ω_{Fstari}	Hz	iznos prednje neprigušene frekvencije
ω_{Rstari}	Hz	iznos stražnje neprigušene frekvencije
ζ	-	relativni koeficijent prigušenja

Sažetak

U radu je prikazana analiza dinamičkih karakteristika bolida Arctos kojeg su 2013. izradili članovi FSB tima formule student. U analizi je naglasak stavljen na opružno-prigušne karakteristike elemenata ovjesa. Prije same analize navedeni su dijelovi FSAE pravilnika, koji se odnose na dinamičke ispitne procedure koje su podloge za simulacije provedene u okviru ovog rada. Kako bi se izradio simulacijski model postojećeg FSAE bolida, na temelju položaja amortizera i opruge i njihovih karakteristika određene su karakteristike ovjesa prilagođene načinu zadavanja unutar programskog paketa za analizu dinamike vozila CarSIM. Obzirom na uočene nedostatke u ponašanju bolida u vožnji, osim opružno-prigušnih karakteristika postojećeg bolida, određene su i nove opružno-prigušnih karakteristike na temelju znanja iz teorije vibracija, zahtijeva iz literature koja se odnosi na razvoj trkaćih vozila i iskustvenih vrijednosti za trkaća vozila. U radu je ukratko prikazana i izrada modela ovjesa u programskom paketu za analizu kinematike Lotus Suspension Analysis i izrada modela kompletnog vozila u programskom paketu CarSIM. Simulacijama vožnje izrađenih modela bolida kroz definirane ispitne procedure uspoređene su dinamičke karakteristike postojećeg bolida i bolida s u ovom radu određenim novim opružno-prigušnim karakteristikama ovjesa.

1. Uvod

Natjecanje SAE Formula Student sastoji se od 9 događaja/utrka na kojoj se natječu ekipe koje su pripremile bolide za ta natjecanja, bilo samo u teoretskom obliku ili praktičnom dijelu. Natjecanje omogućava studentima da kao tim osmisle, konstruiraju, izrade, prezentiraju i natječu se s malim jednosjednim trkačim vozilom u nizu statičkih i dinamičkih natjecanja. Format natjecanja je takav da pruža idealnu priliku studentima da pokažu i unaprijede svoje sposobnosti u izradi kompleksnog i integriranog proizvoda u zahtjevnom okruženju moto sport natjecanja.

Natjecanje se sastoji od statičkog i dinamičkog dijela. Na statičkom dijelu se ocjenjuje konstrukcija bolida, cijena tog bolida i prezentacije projekta. Osim ove tri discipline prema kojima se dobivaju ocjene, potrebno je na samome početku napraviti i tehnički pregled vozila prema kojem se provjerava zadovoljava li bolid pravilnik. Nakon zadovoljenog tehničkog pregleda vozilo smije pristupiti dinamičkom dijelu natjecanja.

Sam tehnički pregled obuhvaća tri dijela, točnije prvo se utvrđuje jeli bolid uopće napravljen u skladu sa pravilnikom. Na ovome pregledu se provjera zadovoljava li za početak sigurnosne zahtjeve ovaj bolid, odnosno posjeduje li homologiranu opremu od strane FIA-e ili neke druge institucije navedene u pravilniku i zadovoljava li minimalne tehničke uvjete propisane pravilnikom. Da bi se moglo prijeći na drugi dio pregleda potrebno je zadovoljiti prethodni. Drugi dio tehničkog pregleda obuhvaća test nagiba, točnije testira se hoće li uslijed naginjanja vozila u kojem se ujedno nalazi i vozač doći do izlivanja tekućina i hoće li bolid izdržati bočno opterećenje pri testiranju. Treći dio pregleda se sastoji od testiranja buke koju proizvodi vozilo, testiranja kočnica i glavnog prekidača vozila.

U teoretskom dijelu se ocjenjuje, kao što je već rečeno cijena bolida, konstrukcija bolida i prezentacija bolida. Cilj je naravno skupiti što više bodova u svim disciplinama, a pri tome pokazati "potencijalnim ulagačima" zašto baš uložiti u taj projekt i prikazati njegove prednosti u odnosu na druge i naravno to ovjekovječiti što prihvatljivijom cijenom.

Dinamički dio natjecanja obrađen je u daljnjem radu. Korištenjem programa za ispitivanje dinamike vozila CarSim ustvrdit će se vozne karakteristike konstruiranog i napravljenog bolida FSB Formula Student tima, a potom izraditi model vozila sa prepravljenim karakteristikama amortizera, opruga i na kraju samog ovjesa.

1.1. Discipline natjecanja

Vozilo svake momčadi uspoređuje se s vozilima drugih momčadi kako bi se ustvrdilo koje je najbolje. Vozila se ocjenjuju u nizu statičkih i dinamičkih natjecanja. Prije statičkog djela natjecanja vozila moraju proći tehnički pregled kojeg obavlja skupina sudaca. Svako vozilo na tehničkom pregledu mora skupiti četiri naljepnice koje označuju njegovu sigurnost i spremnost za izlazak na stazu i koje su uvjet za nastavak natjecanja. Naljepnice se dobivaju za četiri vrlo bitna elementa: opći pregled bolida, pregled curenja tekućina, kontrola buke i test kočenja (engl. *brake test*). U statički dio natjecanja spada prezentacija, konstrukcijska rješenja i analiza troškova.

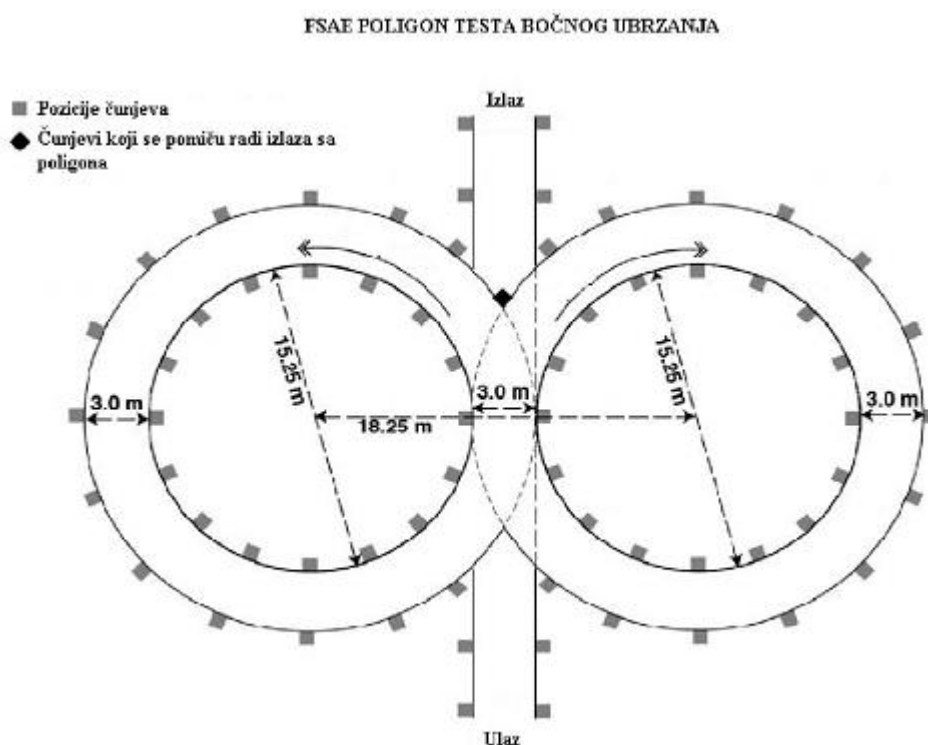
Nakon statičkog dijela natjecanja slijedi dinamički dio. U dinamičkom dijelu natjecanja testiraju se vozne karakteristike vozila. Svaki vozač ima pravo na dva puta sudjelovati u svakoj kategoriji natjecanja osim u zadnjoj.

Dinamički dio natjecanja se sastoji od 5 disciplina:

- Ubrzanje
- Osmica(*engl. Skid Pad*)
- Autokros
- Potrošnja goriva
- Izdržljivost

Ubrzanje je disciplina koja se odvija na 75 metara dugoj stazi. Tu se mjeri ubrzanje bolida i boduje se najbolji pokušaj. Za sva discipline je potrebno imati dva vozača, te svaki od njih ima po dva pokušaja i od ukupno četiri pokušaja se boduje i uzima u obzir onaj najbolji. Uvjet je da se zadanu stazu prijeđe za maksimalno 5.8 sekundi, ekipa dobiva 0 bodova u toj disciplini.

Osmica je disciplina u kojoj se testiraju mogućnosti bolida u prolasku zavoja konstantnog polumjera na ravnoj podlozi, slika 1. U ovoj disciplini također sudjeluju dva vozača koja imaju pravo voziti dva kruga po stazi koja je ograda čunjevima. Rušenjem čunjeva skupljaju se negativni bodovi, a izletavanjem sa staze se dobiva 0 bodova.



Slika 1. Poligon testa bočnog ubrzanja

Autokros je disciplina kojom se testiraju vozne karakteristike bolida. Staza je kružna i sastoji se od zavoja na čijim rubovima se nalaze čunjevi. Na ravnom djelu staze se isto nalaze čunjevi

kroz koje bolid mora proći. Na toj stazi, u ovoj disciplini svaki bolid vozi zasebno i oba vozača voze po dva kruga i mjeri se prolazno vrijeme te se ono najbolje ocjenjuje.

Disciplina u kojoj se mjeri potrošnja goriva i izdržljivost vozila se mjere u isto vrijeme. Svi bolidi koji nastupaju su u isto vrijeme na stazi. Staza je duga 22 km, te svaki od bolida dobije pun spremnik goriva i nakon odvezenih 22 km se mjeri potrošeno gorivo dodavanjem goriva u spremnik. Staza je kružna i svaki vozač mora odvesti 11 km, te nakon toga ide izmjena koja može trajati maksimalno 3 minute. Za vrijeme izmjene vozača nije moguće raditi nikakve preinake na vozilu ili popravke ukoliko se dogodi neki kvar.

Kako bi se prikazala važnost dinamičkog dijela natjecanja prikazan je sustav bodovanja. Iz prikaza se vidi da dinamički dio natjecanja nosi 67,5 % ukupnih bodova.

Bodovi statičkog dijela natjecanja (engl. *Static Events Points*):

➤ Presentacija	75
➤ Inženjerska konstrukcija	150
➤ Analiza troškova	100
➤ Σ	325

Bodovi dinamičkog dijela natjecanja (engl. *Dynamic Events Points*)

➤ Ubrzanje	75
➤ Skid-Pad	50
➤ Autokros	150
➤ Test potrošnje goriva	100
➤ Test izdržljivosti	300
➤ Σ	675

Ukupni broj bodova (engl. Total Points) je 1000.

1.2. Izvadak iz pravilnika (2014 Formula SAE Rules)

Pravilnik natjecanja (2013 Formula SAE Rules) podijeljen je na 7 dijelova: A, T, AF, IC, EV, S i D dio. A dio se odnosi na administrativne zahtjeve, T na tehnička pravila. AF se odnosi na alternativna pravila kostura, IC na vozila s motore s unutarnjim izgaranjem, a EV na tehnička pravila električnih vozila. S dio je za zahtjeve statičkog dijela, a D dinamičkog dijela. Zahtjevi koji trebaju biti zadovoljeni za dinamički dio su u dijelu D pod člancima 1., 4., 5., 6., 7. i 8. U nastavku će biti prikazani spomenuti članci te što je njima propisano za pravilno sudjelovanje u natjecanju.

1.2.1. D dio pravilnika(2014 Formula SAE Rules)

ČLANAK 1: Dinamičko testiranje i maksimalni bodovi

Tablica sa maksimalno moguće ostvarivim bodovima je već navedena u tekstu iznad.

D.1.1 Ispravnost vozila i diskvalifikacija

D.1.1.1 Za vrijeme izvođenja dinamičkih testova, mehanička ispravnost vozila je potrebno održavati

D.1.1.2 Bilo koje stanje vozila koje može ugroziti ispravnost vozila ili bi moglo ugroziti stanje na stazi te nanijeti štetu sudionicima , kao npr.: oštećenje ovjesa, kočnica ili upravljačkog sklopa, istjecanje tekućina, otpadajući djelovi tijela vozila, izgubljeni ili otpali djelovi vozila ili neispravno svjetlo kočnice su razlozi zbog kojeg može doći do isključenja/diskvalifikacije dok se problem ne otkloni.

Napomena: Ako se ovo dogodi za vrijeme ispita izdržljivosti znači trenutnu diskvalifikaciju.

ČLANAK 4: Ograničenja vozača

D4.1 Ograničenje sudjelovanja u testovima

Individualni član tima ne može voziti u više od 3 testiranja.

D4.1.1 Test potrošnje goriva se smatra zasebnim testiranjem iako se odvija paralelno sa testom izdržljivosti.

D4.2 Ograničenje u izviđenju pojedinog testiranja

Individualni član ne može voziti u oba izvođenja testiranja. Ovisi o timu hoće li se natjecati na svakome testiranju.

D4.2.1 Tim može odustati od drugog izvođenja bilo kojeg testiranja.

Napomena: Pri izvođenju natjecanja gdje se provodi testiranje izdržljivosti i potrošnje goriva tim mora imati barem četiri vozača na raspolaganju pri izvođenju samo jedne vožnje svih testiranja. Pri natjecanju gdje se provode dvije vožnje, potrebno je imati na raspolaganju barem pet vozača kako bi se moglo sudjelovati u svim natjecanjima.

ČLANAK 5: Ubrzanje

D5.1 Cilj

Testiranje ubrzanja ocjenjuje ubrzanje vozila po ravnom pravcu na ravnoj podlozi.

D5.2 Procedura testiranja

Opis staze – Duljina staza utrke ubrzanja je 75 metara od startne do ciljne linije. Širina staza je najmanje 4,9 metara širine mjereno između unutarnjih rubova čunjeva koji označavaju stazu. Čunjevi su postavljeni duž staze u intervalima od 5 koraka (oko 6 metara). Pozicije čunjeva nisu označene na pločniku.

D5.2.1 Postavljanje – Prije svega vozilo će biti postavljeno 0,3 metra iza startne linije. Vozila će početi utrku ubrzanja s mjesta.

D5.2.2 Kretanje- Zelena zastava će označiti odobrenje za početak izvođenja, no međutim, mjerenje počinje tek kada vozilo prijeđe startnu liniju.

D5.2.3 Opcija druge vožnje- vozača ima mogućnost hoće li odvesti drugu vožnju odmah nakon izvođenja prve vožnje.

D5.3 Izvođenje ubrzanja

D5.3.1 Testiranje se izvodi dva puta. Svako izvođenje mora izvoditi drugi vozač, a svaki vozač ima pravo na dva pokušaja.

D5.4. Trakcija gume - ograničenja

Specijalni dodaci koji pojačavaju trakciju nesmiju se dodavati na gume i stazu, te nije dozvoljeno proklizavanje gume tzv. “burnouts”.

D5.5 Bodovanje ubrzanja

Bodovanje utrke ubrzanja je bazirano na vremenu potrebnom da se prođe staza. Zabilježeno vrijeme će se mjeriti od kada vozilo prođe startnu liniju i sve dok ne prođe ciljnu liniju.

D5.8 Formula za bodovanje testa ubrzanja

D5.8.1 Rezultat testa ubrzanja se nalazi između nule i sedamdeset i pet i računa se prema napravljenom vremenu.

D5.8.2 Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:

$$\text{Bodovi ubrzanja} = (71,5 \times (T_{\max} / T_{\text{your}}) - 1) / ((T_{\max} / T_{\min}) - 1) + 3,5 \quad (1)$$

Oznake:

T_{your}: najbolje vrijeme koje je tim postigao uključujući i penale

T_{min}: vrijeme koje je napravilo najbrže vozilo

T_{max}: 150 % od T_{min}

ČLANAK 6: SKID-PAD NATJECANJE

D6.1 Skid-Pad -Cilj

Cilj Skid-Pad natjecanja je ispitati sposobnost skretanja vozila u zavoju na ravnoj podlozi dok radi krugove konstantnog radijusa.

D6.4 Skid - Pad staza (Slika 2.)

Postavljena su dva para koncentričnih krugova u obliku osmice. Centri krugova će biti udaljeni 18,25 metara. Unutarnji krugovi su promjera 15,25 metara, a vanjski 21,25 metara. Širina staze je 3 metra, i to je udaljenost između vanjskog i unutarnjeg kruga. Vozila će ući na stazu kroz prolaz širine 3 metra koja je tangencijalna s mjestom gdje se krugovi sijeku. Linija između centara krugova definira startnu/ciljnu liniju. Jedan krug je definiran tako da putujući po jednom krugu krenemo od startne/ciljne linije i vratimo se na to isto mjesto.

D6.6 Skid - Pad procedure

Vozilo ulazi okomito u figuru osmice i radi dva puna desna kruga te dva puna lijeva kruga. Drugi i četvrti krug su mjereni krugovi. Po završetku četvrtog kruga vozilo će izaći sa staze u istom smjeru u kojem je i ušao. Vozač ima opciju ponoviti vožnju odmah nakon prve vožnje.

D6.7 Skid - Pad kazne

Uzima se prosjek vremena izmjereno za lijevu i desnu stranu kruga nakon zbrajanja vremena sa kaznama.

D6.7.1 Srušeni čunjevi

Kazna od 0,25 sekundi biti će dodana na vrijeme za svaki čunj koji je srušen.

D6.7.2 Izvan staze

Vozila koja se izvrte mogu nastaviti vožnju sve dok nisu otišla van staze. Vozila koja odu van staze biti će klasificirana kao DNF (nije završio, engl. did not finish)

D6.8 Skid - Pad bodovanje

D6.8.1 Skid-pad rezultat se računa na temelju sposobnosti bočnog ubrzanja. Bočno ubrzanje (obično se naziva G's) izračunava se iz $2,012 \text{ promjer}/t^2$. Promjer 17,10 metara preuzet će se u računanje bočnog G.

D6.8.3 Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:

Slika 1. Poligon testa bočnog ubrzanja

Oznake:

T_{your}: prosječno vrijeme najboljeg lijevog i desnog kruga uz penale

T_{min}: najbolje vrijeme

T_{max}: 125 % od T_{min}

ČLANAK 7: AUTOCROSS NATJECANJE

D7.1 Autocross - cilj

Cilj autocross natjecanja je ocijeniti upravljivost i kvalitetu rukovanja na uskoj stazi bez zapreka. Autocross natjecanje kombinira vozne izvedbe kao što su karakteristike ubrzanja, kočenja i skretanja u jednom natjecanju.

D7.2 Autocross specifikacije staze i brzina

D7.2.1 Sljedeće standardne specifikacije će odrediti maksimalnu brzinu koja se može postići na stazi. Prosječne brzine bi trebale biti od 40 km/h do 48 km/h.

Pravci: Ne duži od 60 metara s oštrim zavojima na krajevima ili duži od 45 metara s blagim zavojima na kraju.

Zavoji konstantnog radijusa: Zavoji promjera od 23 metra do 45 metara.

Oštri zavoji: Najmanje od 9 metara u vanjskom promjeru zavoja.

Slalomi: Čunjevi u pravcu s razmakom od 7,62 metra do 12,19 metara.

Razno: Šikane, više zavoja, zavoji u kojima se smanjuje polumjer, itd. Najmanja širina staze je 3,5 metra.

D7.2.2 Dužina staze biti će približno 805 metara i vozači će završiti određeni broj krugova.

D7.3 Autocross procedura

D7.3.4 Vozilo se pozicionira tako da prednji kotač bude 6 metara iza startne linije. Mjerač vremena počinje odbrojavati nakon što vozilo prođe startnu liniju.

D7.4 Autocross kazne

Ocjenjuje se postignuto vrijeme plus kazne. Sljedeće kazne se dodaju na postignuto vrijeme:

D7.4.1 Srušeni čunjevi

Dvije sekunde po čunju, uključujući i one nakon ciljne linije.

D7.4.2 Izlazak sa staze (OC)

a) Izlazak sa staze se događa kada vozilo ima sva četiri kotača van granica staze, koja je označena sa (a) čunjevima, (b) označenim rubovima, (c) rubovima asfaltirane površine. Ako na stazi ima više indikatora staze, u bilo kojem trenutku najuži dio staze koristit će se za određivanje kazne.

b) Kada se OC dogodi vozač mora ponovno ući na stazu gdje je izletio, u protivnom se kažnjava sa 20 sekundi kazne.

c) Dva kotača van staze neće istog trena uzrokovat kaznu. Ali ponovljena takva vožnja je uzrok za crnu zastavu.

d) Kazne se neće dodjeljivati za izbjegavanje nesreća ili drugih razloga koji se smatraju dovoljno dobrim razlogom od strane sudaca na stazi.

D7.4.3 Propušteni slalom

Neprolazak kroz jedno ili više vrata danog slaloma će se brojati kao izlazak sa staze. Svaka takva pojava kažnjavat će se sa 20 sekundi kazne.

D7.6 Točno prolazno vrijeme

D7.6.2 Vozilima koja su u nemogućnosti završiti stazu sa prosječnom brzinom od 69 % najbržeg vozila neće se dodijeliti bodovi za izvedbu. To znači da ako prolazno vrijeme autocrossa prelazi 145 % od najbržeg vozila neće se dobiti bodovi.

D7.8 Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:

$$\text{Autokros bodovi} = 142,5 \times \frac{(T_{\max}/T_{\text{your}}) - 1}{(T_{\max}/T_{\min}) - 1} + 7,5 \quad (2)$$

Oznake:

T_{your}: najniže vrijeme kruga vožnje koje je zabilježeno za tim

T_{min}: najniže vrijeme kruga za svaki od timova u svakom pokušaju

T_{max}: 145% od T_{min}

ČLANAK 8: IZDRŽLJIVOST I POTROŠNJA

D8.2 Pravo vozača

Utrka izdržljivosti i utrka potrošnje goriva su dva različita događanja iako se izvode istovremeno. Dakle, svatko tko sudjeluje u utrci izdržljivosti i utrci potrošnje goriva koristi dva vozača.

D8.4 Utrka izdržljivosti – cilj —300 bodova

Utrka izdržljivosti je napravljena da ocijeni sveukupnu učinkovitost vozila i testira vozilu trajnost i pouzdanost.

D8.5 Utrka potrošnje goriva —100 bodova

Potrošnja goriva vozila biti će izmjerena u sklopu s utrkom izdržljivosti. Učinkovitost pod uvjetima natjecanja je važna u natjecanjima vozila i pokazuje koliko dobro je vozilo podešeno za natjecanje. To je kompromis natjecanje jer će se rezultati potrošnje goriva i izdržljivosti računati iz istog natjecanja. Ponovno punjenje nije dozvoljeno za vrijeme natjecanja.

D8.6 Utrka izdržljivosti specifikacije staze i brzina

- D8.6.1 Sljedeće standardne specifikacije će predložiti najveću brzinu koja se može naći na stazi. Prosječne brzine bi trebale biti od 48 km/h do 57 km/h dok bi maksimalne brzine trebale dostizati 105 km/h.
- D8.6.2 Standardne specifikacije za FSAE utrku izdržljivosti su:
- Pravci:** Ne duži od 77 metara s oštrim zavojima na krajevima ili duži od 61 metara s blagim zavojima na kraju. Biti će zona pretjecanja na nekoliko lokacija.
- Zavoji konstantnog radijusa:** Zavoji promjera od 30 metra do 54 metra.
- Oštri zavoji:** Najmanje od 9 metara vanjski promjer zavoja.
- Slalom:** Čunjevi u pravcu s razmakom od 9 metra do 15 metara.
- Razno:** Šikane, više zavoja, zavoji u kojima se smanjuje polumjer, itd. Najmanja širina staze je 4,5 metra.
- D8.7 Utrka izdržljivosti generalna procedura**
- D8.7.1 Događaj će se izvoditi kao jedno natjecanje dugo otprilike 22 kilometra.
- D8.7.2 Ekipama nije dozvoljeno raditi na vozilu za vrijeme natjecanja.
- D8.7.3 Zamjena vozača mora se dogoditi za vrijeme tri minute na polovici natjecanja.
- D8.7.4 Vožnja kotač uz kotač nije dozvoljena.
- D8.7.5 Vozilo ne smije biti voženo unazad.
- D8.7.6 Pretjecanje drugog vozila dozvoljeno je samo u određenim zonama pretjecanja ili uz kontrolu voditelja natjecanja.
- D8.7.7 Mjereno vrijeme će početi kada Vozač A uđe na stazu i prođe liniju koja mjeri vrijeme.
- D8.15 Utrka izdržljivosti minimalna potrebna brzina.**
- D8.15.1 Ako vozilo nije u mogućnosti zadržati vrijeme od 145 % najbržeg vremena staze, mora odmah izaći sa staze.
- D8.18 Utrka izdržljivosti kazne**
- D8.18.1 Kazne se neće dodjeljivati za izbjegavanje nesreća ili drugih razloga koji se smatraju dovoljno dobrim razlogom od strane dužnosnika na stazi.
- D8.18.2 Kazne koje su na snazi tijekom utrke izdržljivosti navedene su u nastavku:
- D8.18.3 Srušeni čunjevi
- Dvije sekunde po čunju, uključujući i one nakon ciljne linije i prije startne linije.
- D8.18.4 Izlazak sa staze (OC)
- a) Izlazak sa staze se događa kada vozilo ima sva četiri kotača van granica staze, koja je označena sa (a) čunjevima, (b) označenim rubovima, (c) rubovima asfaltirane površine. Ako na stazi ima više indikatora staze, u bilo kojem trenutku najuži dio staze koristit će se za određivanje kazne.

b) Kada se OC dogodi vozač mora ponovno ući na stazu gdje je izletio u protivnom se kažnjava sa 20 sekundi kazne.

c) Dva kotača van staze neće istog trena uzrokovat kaznu. Ali ponovljena takva vožnja

je uzrok za crnu zastavu.

D8.18.5 Propušteni slalom

Neprolazak kroz jedno ili više vrata danog slaloma će se brojati kao izlazak sa staze. Svaka takva pojava kažnjavat će se sa 20 sekundi kazne.

D8.20 Izraz za bodovanje na testu izdržljivosti

D8.20.1 Vremena na testu izdržljivosti će se računati na temelju zbroja ukupnog vremena svakog vozača pojedinačno uz kazne.

D820.2 Izraz za računanje bodova na testiranju:

Ako je **T_{your}** < ili = **T_{max}**:

$$\text{Bodovi na testiranju} = 250 \times \frac{(T_{\max}/T_{\text{your}}) - 1}{(T_{\max}/T_{\min}) - 1} + 50 \quad (3)$$

Ako je **T_{your}** > **T_{max}**: Bodovi na testiranju=0

T_{min} je najlošije vrijeme najbrže momčadi na testiranju

T_{your} je kombinirano vrijeme oba vozača testiranja

T_{max} je 145 % od **T_{min}**

Ako su bodovi < **Laps Comp**, tada bodovi = **Laps Comp**

Laps Comp je broj potpuno završeni krugova cijele momčadi.

D8.22 Izraz za računanje potrošnje goriva

D8.22.1 CO₂ koeficijent pretvaranja

Masa CO₂ ispuštena u atmosferu će se proračunati pomoću koeficijenta pretvaranja koji su niže navedeni iz količine goriva koja je potrošena. Koeficijent bi trebali pokazati prosječnu potrošnju goriva i organizatori neće uzimati u obzir otkuda je gorivo došlo.

Bezolovni benzin - 2,31kg CO₂ po litri goriva

Električna energija - 0,65kg CO₂ po kWh

E85 - 1,65kg CO₂ po litri goriva

NAPOMENA: iznos električne energije predviđa i gubitke pri punjenju ako su ćelije punjene preko dva sata

D8.22.3 Izrazi za računanje potrošnje goriva

$$\text{Bodovi za potrošnju} = 100 \times \left(\frac{(FuelEfficiencyFactor_{min} / FuelEfficiencyFactor_{YOUR}) - 1}{(FuelEfficiencyFactor_{min} / FuelEfficiencyFactor_{MAX}) - 1} \right)$$

(4)

$$\text{Faktor potrošnje} = 100 \times \left(\frac{(T_{MIN} / Laptotal_{TMIN})}{(T_{YOURS} / Lapyours)} \right) \times \left(\frac{(CO_{2MIN} / Laptotal_{CO2MIN})}{(CO_{2YOURS} / Lapyours)} \right)$$

(5)

Oznake:

CO_{2MIN} je najmanja masa CO₂ koja je izračunata za svakog natjecatelja, čije proračunato vrijeme T_{your} y 1.45 x korigirano prosječno vrijeme najbrže ekipe koja završi test izdržljivosti.

CO_{2your} je količina CO₂ koju je postigla momčad

T_{min} je najniže korigirano vrijeme pri testu izdržljivosti najbrže momčadi pri testiranju, čija potrošnja ne prelazi 26litara/100km ili energetski ekvivalent od 60.06kg CO₂/100km.

T_{your} je kombinirano korigirano vrijeme vozača u tvojoj vožnji.

Lapyours broj krugova prema kojima je ocjenjena momčad.

Laptotalmin and **LaptotalCO_{2min}** je broj krugova koje je završila momčad koja je postavila T_{min} i CO_{2MIN}.

FuelEfficiencyFactormin se računa koristeći CO_{2YOUR} koji je ekvivalentan 60.06kg CO₂/100km i T_{yours} koji treba približno odgovarati 1.45 od ukupno korigiranog vremena najbrže momčadi koja završi test izdržljivosti u potpunosti.

D8.27 Utrka izdržljivosti - pretjecanje

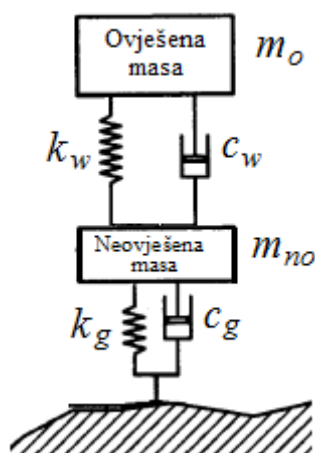
D8.27.2 Zone pretjecanja imaju dvije paralelne linije – spora linija je za vozila koje se prelazi, a brza linija je za vozila koja pretječu neko vozilo. Prilazeći zoni pretjecanja sporijem vodećem vozilu biti će pokazana plava zastava i to vozilo mora otići u sporu liniju i usporiti. Vozilo koje je brže će nastaviti ići po brznoj

liniji i preteći vozilo. Vozilo koje je pretekuto može se vratiti u promet samo uz kontrolu čovjeka sa zastavama koji je na kraju zone pretjecanja.

D8.27.5 U normalnim uvjetima vožnje kada nema pretjecanja svi auti mogu koristiti brzu liniju.

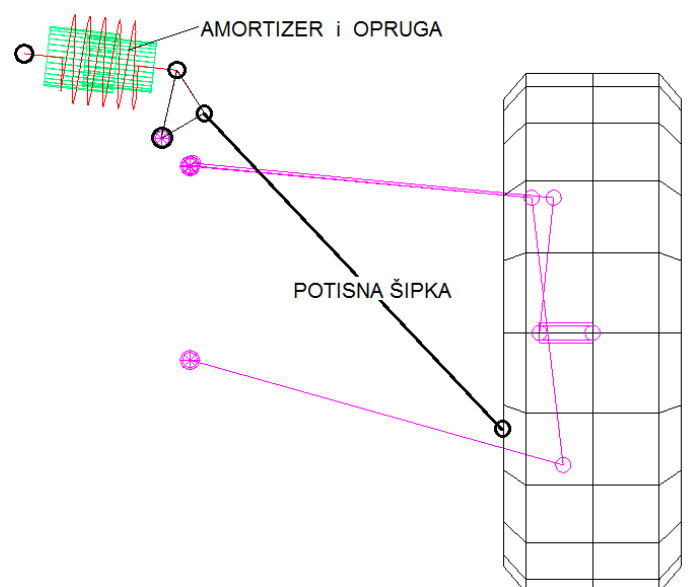
2. Pozicioniranje amortizera

Analiza vozila, bočnog i uzdužnog naginjanja vozila, se temelji na koeficijentu prigušenja amortizera C_w na kotaču. Međutim amortizer sam po sebi nije pozicioniran na kotaču nego je ugrađen unutar ili izvan šasije vozila. Amortizer u ovom slučaju djeluje preko donjeg ramena ovjesa koji je povezan sa potisnom šipkom (engl. *pushrod*) preko poluge (engl. *rocker*). Za definiranje karakteristike amortizera u simulacijskom programu CarSIM nije ispravno definirati krivulju samoga amortizera iz razloga što program koristi matematički model MDS (engl. *Mass Dumper Spring*) kako je prikazano na slici 2. Za određivanje karakteristike amortizera i opruge u ravnini okomitoj na tlo koja prolazi kroz središte kotača potrebno je uračunati omjer poluge.



Slika 2. Pojednostavljeni vibracijski model četvrtine vozila

Definiranje omjera poluge, uzimajući u obzir učinke promjene prijenosnog omjera obradit će se u sljedećem poglavlju. Stvarana pozicija amortizera i opruge prikazana je na slici 3. te se sila koja djeluje na kotač prenosi do amortizera i opruge preko potisne šipke (engl. *pushrod*) i klackalice (engl. *rocker*). Krivulju amortizera potrebno je preko prijenosnog omjera klackalice i potisne šipke projicirati na ravninu koja je okomita na tlo i prolazi kroz središnju os kotača. Utjecaj na prijenosni omjer hoda amortizera i hoda kotača, osim omjera poluge ima i položaj potisne šipke. Podešavanjem prijenosnog omjera poluge i potisne šipke moguće je utjecati na konačnu karakteristiku opruge i amortizera. Iako je podešavanjem prijenosnog omjera moguće utjecati na karakteristiku preporuka je konstruirati ovjes sa prijenosnim omjerom što bliže jedinici [1].



Slika 3. Prikaz položaj amortizera i opruge kako je konstruirano na stvarnom modelu FSB Arctos

3. Prijenosni omjer potisne poluge

Za vertikalno gibanje kotača gore (engl. *bump*) i dolje (engl. *rebound*) od neutralnog položaja (visina vozila od najniže točke podnice do tla) z_S te sabijanja i izduživanja amortizera za iznos z_D dobiva se omjer navedenih pomaka definiran kao $R_{D/S}$ (omjer hoda amortizer u odnosu na hod kotača), skraćeno se piše samo R_D .

$$R_{D/S} = \frac{\delta z_D}{\delta z_S} \quad (6)$$

Iznos omjera poluge R_D je neovisan o hodu kotača z_S i δz_S ako je sustav linearan, npr. R_D konstantan, što najčešće nije slučaj. Uz pomoć računalnog programa za analizu geometrije ovjesa kao što je Lotus, prijenosni omjer je moguće odrediti na gore prikazani način, uzimajući δz_S da bude relativno male vrijednosti npr. 1 mm ili 0,1 mm. Matematički, iznos prijenosnog omjera se dobije kad δz_S teži u nulu. Rezultat je u tom slučaju derivacija:

$$R_D = \frac{dz_D}{dz_S} \quad (7)$$

Definicija derivacije R_D može se produžiti dodavanjem vremenskog elementa:

$$R_D = \frac{dz_D}{dt} \times \frac{dt}{dz_S} \quad (8)$$

Dva izraza na desnoj strani jednakosti su brzine, stoga se R_D može napisati kao:

$$R_D = \frac{v_D}{v_S} \quad (9)$$

Iz izraza (99) može se zaključuje da je prijenosni omjer jednak omjeru brzina komprimiranja amortizera i podizanju kotača (engl. *bump*).

Uzimajući u obzir pomak potisne šipke (engl. *pushrod*) z_P , poveznice između poluge i kotača, sveukupni prijenosni omjer R_D iznosi:

$$R_D = \frac{dz_D}{dz_P} \times \frac{dz_P}{\delta dz_P} = R_{D/P} \times R_{P/S} \quad (10)$$

stoga sveukupni prijenosni omjer je produkt sljedećih omjera.

U odnosu na brzine v_D – brzina kretanja amortizera [m/s]

v_P – brzina kretanja potisne šipke (engl. *pushrod*) [m/s]

v_S – vertikalna brzina kretanja kotača [m/s]

$$R_D = \frac{v_D}{v_P} \times \frac{v_P}{v_S} = \frac{v_D}{v_S} \quad (11)$$

3.1. Utjecaj prijenosnog omjera

Utjecaj prijenosnog omjera poluge MR na karakteristiku opruge koja djeluje u ravnini kotača je konstanta opruge k_S pomnožen sa prijenosnim omjerom na kvadrat:

$$K_W = K_S \cdot MR^2 \text{ [N/mm]} \quad (12)$$

gdje je:

MR - ukupni prijenosi omjer sustava ovjesa [-]

K_W – konstanta opruge u ravnini kotač [N/mm]

K_S – konstanta opruge [N/mm]

Prethodna jednadžba se odnosi na konstantni prijenosni omjer. Izraz (12) odnosi se i na amortizer ukoliko isti ima linearnu karakteristiku.

Uzme li se u obzir amortizer nelinearne karakteristike koji prigušuje silu F_D pri relativnoj brzini gibanja amortizera v_D izraz glasi:

$$F_D = C_1 \cdot v_D^n \text{ [N]} \quad (13)$$

gdje je:

n - eksponent vrijednosti:

1 - za linearnu karakteristiku amortizera,

0 - Colombovo prigušenje,

2 - čisto fluidno dinamičko prigušenje.

C_1 – koeficijent prigušenja [Ns/m]

Za prijenosni omjer poluge amortizera R_D i vertikalne brzine podizanja kotača (engl. *bump*) v_S brzina kretanja amortizera iznosi:

$$v_D = R_D \cdot v_S \text{ [m/s]} \quad (14)$$

Iz čeka slijedi da je sila u amortizeru F_D :

$$F_D = C_1 \cdot (R_D \cdot v_S)^n \text{ [N]} \quad (15)$$

a sila na kotaču iznosi:

$$F_W = R_D \cdot F_D \text{ [N]} \quad (16)$$

Stoga, sila koja djeluje na amortizer koja djeluje u ravnini kotača iznosi:

$$F_W = C_1 \cdot R_D^{1+n} \cdot v_S^n \text{ [N]} \quad (17)$$

Iz izraza (17) utjecaj brzine v_S na silu na kotaču F_W je zadržan kao v_S^n , dok je koeficijent skaliran prijenosnim omjerom poluge koji u ovom slučaju iznosi R_D^{1+n} .

Za određivanje karakteristike amortizera u ravnini kotača primijenit će se aproksimacija točaka krivulje amortizer krivuljom polinoma, na taj način krivulja nije definirana eksponentom n koji se može mijenjati, nego je definirana samom krivuljom.

Sila koja djeluje na amortizer u ovisnosti o brzini gibanja klipa amortizera:

$$F_D = C_0 + C_1 \cdot v_D + C_1 \cdot v_D^2 + C_1 \cdot v_D^3 + \dots + C_r \cdot v_D^r \quad [\text{N}] \quad (18)$$

sila koja djeluje na amortizer u ovisnosti o vertikalnoj brzini podizanja kotača:

$$F_D = C_0 + C_1 \cdot R_D \cdot v_S + C_1 \cdot R_D^2 \cdot v_S^2 + C_1 \cdot R_D^3 \cdot v_S^3 + \dots + C_r \cdot R_D^r \cdot v_S^r \quad [\text{N}] \quad (19)$$

vertikalna sila na kotaču u ovisnosti o vertikalnoj brzini gibanja kotača izražena preko prijenosnog omjera poluge R_D :

$$F_{DW} = R_D \cdot C_0 + C_1 \cdot R_D^2 \cdot v_S + C_1 \cdot R_D^3 \cdot v_S^2 + C_1 \cdot R_D^4 \cdot v_S^3 + \dots + C_r \cdot R_D^{r+1} v_S^r \quad [\text{N}] \quad (20)$$

Postupak određivanja karakteristike amortizera u ravnini kotača bazira se na aproksimaciji krivulje amortizera prikazane funkcijom polinoma (20) iz kojeg se dobivaju koeficijenti polinoma $C_0, C_1, C_2, \dots, C_n$, dobiveni koeficijenti definiraju krivulju polinoma. Za određivanje krivulje amortizera u ravnini kotača potrebno je poznavati omjer poluge (engl. *rocker*) dobiven algebarskom metodom koja daje bolji uvid u dizajn od numeričkih metoda. U sljedećem poglavlju će se opisati algebarsku (grafičku) metodu za ovjes trkaćeg vozila ili u ovom slučaju vozila formule student.

Primarni zadatak je odrediti geometriju poluge (engl. *rocker*) zatim slijede krute veze ovjesa kao i potisne šipke (engl. *pushrod*).

3.2. Poluga (engl. rocker)

Primarna komponenta prijenosnog omjera je poluga koja služi kao glavna poveznica između kotača (ramena ovjesa) te amortizera i opruge. Primjenom potisne šipke (engl. *pushroda*) i poluge (engl. *rockera*) opruga i amortizer se mogu pozicionirati, unutar okvira bolida, što poboljšava aerodinamiku, mogućnost utjecanja na centar gravitacije pozicioniranjem opruge i amortizera te podešavanjem karakteristike amortizera promjenom omjera poluge.

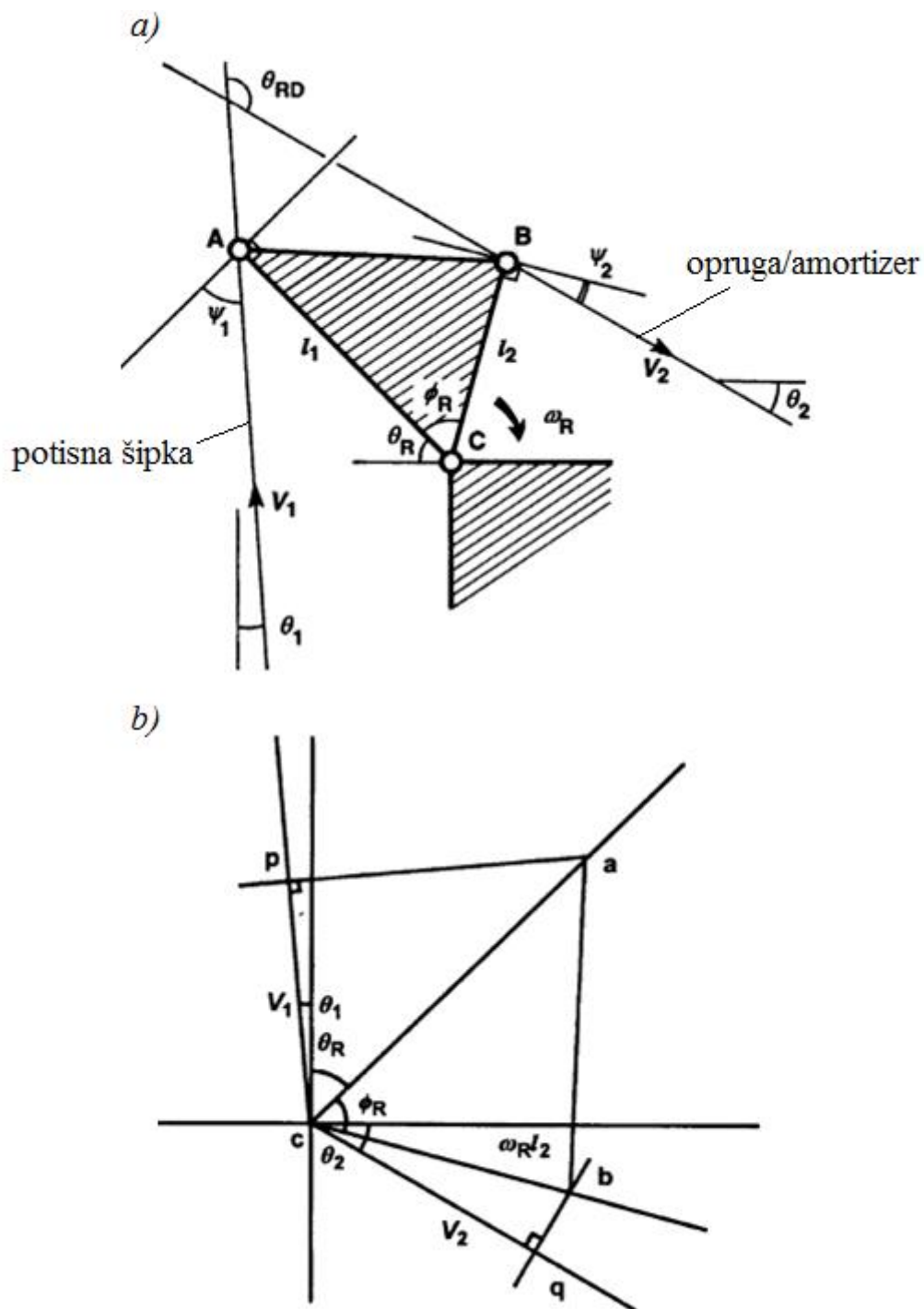
Postojeća prednja poluga primijenjena na ovjesu bolida formule student FSB Arctos korištena je u analizi ovjesa (Slika 4.).



Slika 4. Poluga bolida FSB Arctos

Slika 5. prikazuje polugu sa ulaznom brzinom v_1 preko potisne šipke (engl. *pushrod*) te izlaznom brzinom v_2 na amortizeru. Također su prikazani ulazni i izlazni kutovi kao i kut otklona θ_{RD} , otklon između ulazne i izlazne brzine, koji se definira na normalnoj visini vožnje iako varira tokom cijelog hoda poluge.

Generalni prikaz ulaznih i izlaznih brzina prikazan kao i odgovarajućih kutova prikazan je na slici 5. zajedno sa dijagramom brzina (Slika 5.b).



Slika 5. Skica poluge sa pripadajućim brzinama i njihovim kutovima (a); Dijagram brzina (b) [2]

Prijenosni omjer R_R , definiran za početnu visini vozila, ovisi o udaljenosti točaka prihvaćišta potisne šipke/amortizera do centra rotacije poluge, ali također ovisi o kutu ulaza/izlaza potisne šipke ili amortizera.

Parametri konstanti kroz cijelo područje gibanja poluge su l_1 , l_2 i kut ϕ_R , ova tri parametra su osnova svake poluge. Parametri koji utječu na ponašanje poluge su θ_{RD} , R_D i f_R te su izvedeni na sljedeći način.

Kut odklona:

$$\theta_{RD} = \psi_1 + \phi_R + \psi_2 \quad [^\circ] \quad (21)$$

Prijenosni omjer gibanja poluge je R_R te iznosi

$$R_R = \frac{v_Q}{v_P} = \frac{cq}{cp} \quad (22)$$

cq – označava brzinu kompresije amortizera [mm/s], a cp – predstavlja ulaznu brzinu na potisnoj šipci (engl. *pushrod*) [mm/s].

Pa je omjer brzina poluge definiran kao $R_R = v_2/v_1$ te iz toga proizlazi:

$$R_R = \frac{\omega_R \cdot l_2 \cdot \cos \psi_2}{\omega_R \cdot l_1 \cdot \cos \psi_1} \quad (23)$$

Kutna brzina jednaka je za cijelu polugu:

$$R_R = \frac{l_2 \cdot \cos \psi_2}{l_1 \cdot \cos \psi_1} \quad (24)$$

Prijenosni omjer može se rastaviti na dvije komponente. Prijenosni omjer krakova poluge:

$$R_R = \frac{l_2}{l_1} \quad (25)$$

i prijenosni omjer kutova ulaznih i izlaznih brzina:

$$R_R = \frac{\cos \psi_2}{\cos \psi_1} \quad (26)$$

Prijenosni omjer gibanja može se izraziti kao $R_R = R_{RL} \cdot R_{R\psi}$ prvi od ova dva parametra, R_{RL} , je konstantan. Drugi, $R_{R\psi}$, varira kako se poluga zakreće i predstavlja osnove za konstruiranje faktora stope rasta prijenosnog omjera f_R (engl. *Rising rate*).

Uzimajući u obzir da je kut ulazne i izlazne brzine jednak u bilo kojem položaju poluge, odnosno da ostaju paralelni na početno stanje, te uzimajući da je kut ψ pozitivan, kako je prikazano na slici 5. za kut zakreta poluge θ u smjeru kazaljke na satu od neutralne visine vožnje.

$$\psi_1 = \psi_{Z1} + \theta \quad [^\circ] \quad (27)$$

$$\psi_2 = \psi_{Z2} - \theta \quad [^\circ] \quad (28)$$

gdje su ψ_{Z1} i ψ_{Z2} vrijednosti ψ za normalnu visinu vožnje.

Tada slijedi da je:

$$R_{R\psi} = \frac{\cos(\psi_{Z2} - \theta)}{\cos(\psi_{Z1} + \theta)} \quad (29)$$

Faktor stope rasta prijenosnog omjera f_R pri normalnoj visini vožnje je definirana kao:

$$f_R = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{dR_R}{d\theta_R} \quad (30)$$

Uzimajući u obzir infinitezimalno mali θ , f_R poprima oblik:

$$f_R = \tan \psi_1 + \tan \psi_2 \quad (31)$$

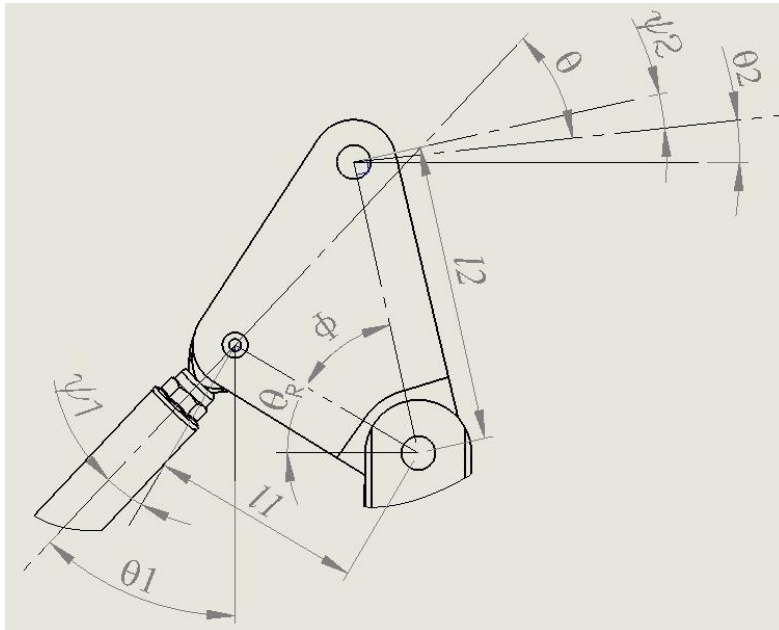
Iz čega slijedi da je prilikom zakreta poluge za kut θ prijenosni omjer poluge R_R :

$$R_R = R_{RL} \cdot R_{R\psi}(1 + f_R \theta) \quad (32)$$

Dobiveni prijenosni omjer uvršten u jednadžbu (20) daje karakteristiku amortizera na kotaču.

3.2.1. Izračun prijenosnog omjera prednje poluge

Proračun prijenosnog omjera kao i izvod krivulje karakteristike amortizera napravljen je u programskom paketu Matlab.



Slika 6. Kutovi ulaznih i izlaznih brzina poluge prednjeg kotača

Prijenosni omjer R_{RL} računa se kao omjer dužina $R_{RL} = l_2/l_1$

Svi podaci prikazani su na slici 6. odnose za bolid FSB Arctos te se odnosi na polugu prednjeg ovjesa:

$$l_2 = 70 \text{ mm}$$

$$l_1 = 50 \text{ mm}$$

$$R_{RL} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{70}{50} = 1,4 \quad (33)$$

Prijenosni omjer ulaznog i izlaznog kuta brzine

$$R_{R\psi} = \frac{\cos(\psi_{Z2} - \theta)}{\cos(\psi_{Z1} + \theta)} \quad (34)$$

gdje je :

$$\phi_R = 47^\circ$$

$$\theta_R = 30,47^\circ$$

$$\theta_1 = -43,23^\circ$$

$$\theta_2 = -6,24^\circ$$

Kutovi za određivanje prijenosnog omjera dobiveni iz geometrije prema slici 5.b.

$$\psi_{Z1} = \theta_R + \theta_1 = -12,76^\circ$$

$$\psi_{Z2} = \theta_R + \phi_R - \theta_2 - 90^\circ = -6,29^\circ$$

Za proračun prijenosnog omjera koristit će se neutralni položaj poluge za koji se uzima kut $\theta = 0^\circ$ te iz toga slijedi:

$$R_{R\psi} = \frac{\cos(-6.29 - 0)}{\cos(-12.76 + 0)} = 1,0191 \quad (35)$$

Faktor stope rasta (engl. *Rising factor*) prijenosnog omjera iznosi:

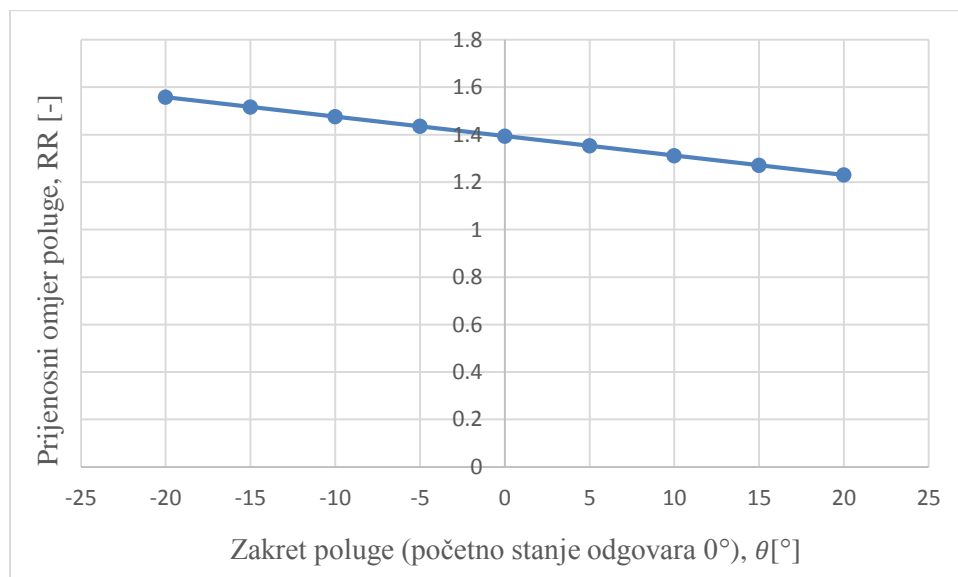
$$f_R = \tan \psi_{Z1} + \tan \psi_{Z2} = -0,3367 \quad (36)$$

Minus predznak ukazuje na smanjenje prijenosnog omjera prilikom hoda kotača prema gore (engl. *bump*), odnosno zakreta klackalice u pozitivnom smjeru (kopresija amortizera).

Dobiveni prijenosni omjer poluge je:

$$R_R = R_{RL} \cdot R_{R\psi} \cdot (1 + f_R \cdot \theta) = 1,4 \cdot 1,0191 \cdot (1 + (-0,3367 \cdot 0)) = 1,4268 \quad (37)$$

Prijenosni omjer poluge prema izrazu (37) iznosi 1,4268 i taj omjer odnosi se samo za položaj poluge u neutralnom položaju ili položaju normalna visine vožnje vozila. Promjena prijenosnog omjera u ovisnosti o zakretu poluge prikazana je na slici 7. Iako omjer poluge nije konstantan u cijelom području kretanja za proračun krivulje amortizera koristit će se iznos za poziciju poluge pri normalnoj visini vožnje vozila ($\theta = 0^\circ$).



Slika 7. Promjena iznosa prijenosnog omjera poluge u ovisnosti o zakretu poluge

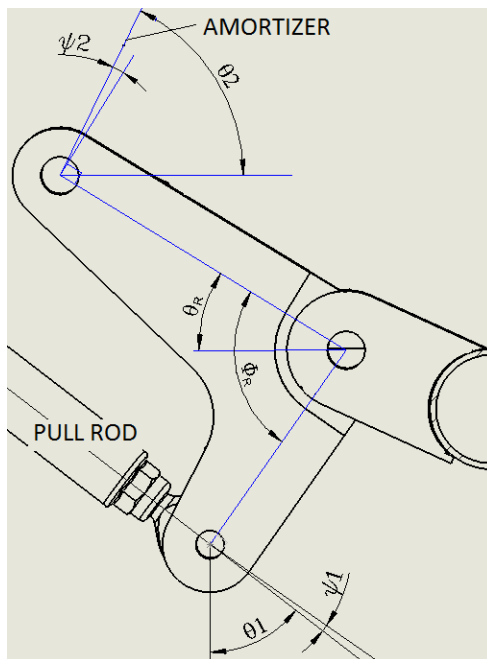
Kod ovjesa sa dvostrukim poprečnim ramenima potrebno je odrediti prijenosni omjer između brzine gibanja kotača i kutne brzine poprečnog ramena koji djeluje na potisnu šipku, a potom i na polugu amortizera. Ukupni prijenosni omjer amortizera iznosi:

$$R_D = R_S \cdot R_R = 0,47 \cdot 1,4267 = 0,67 \quad (38)$$

gdje je R_S prijenosni omjer ovjesa.

3.2.2. Izračun prijenosnog omjera stražnje poluge

Na slici 8. prikazana je poluga stražnjeg ovjesa sa odgovarajućim kutovima.



Slika 8. Kutovi ulaznih i izlaznih brzina poluge prednjeg kotača

Prijenosni omjer R_{RL} izračuna se kao omjer dužina $R_{RL} = l_2/l_1$
Svi podaci prikazan su na slici 4.

$$l_2 = 70 \text{ mm}$$

$$l_1 = 50 \text{ mm}$$

$$R_{RL} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{70}{50} = 1,4 \quad (39)$$

Prijenosni omjer ulaznog i izlaznog kuta brzine

$$R_{R\psi} = \frac{\cos(\psi_{Z2} - \theta)}{\cos(\psi_{Z1} + \theta)} \quad (40)$$

gdje je :

$$\phi_R = 86,46^\circ$$

$$\theta_R = -55,15^\circ$$

$$\theta_1 = 52,5^\circ$$

$$\theta_2 = -64,09^\circ$$

Kutovi za određivanje prijenosnog omjera dobiveni iz geometrije prema slici 5.b.

$$\psi_{Z1} = \theta_R + \theta_1 = -2,65^\circ \quad (41)$$

$$\psi_{Z2} = \theta_R + \phi_R - \theta_2 - 90^\circ = 5,4^\circ \quad (42)$$

Za proračun prijenosnog omjera koristit će se početno stanje poluge za koje se uzima kut $\theta = 0^\circ$ te iz toga slijedi:

$$R_{R\psi} = \frac{\cos(5,4 - 0)}{\cos(-2,65 + 0)} = 0,996 \quad (43)$$

Faktor stope rasta prijenosnog omjera:

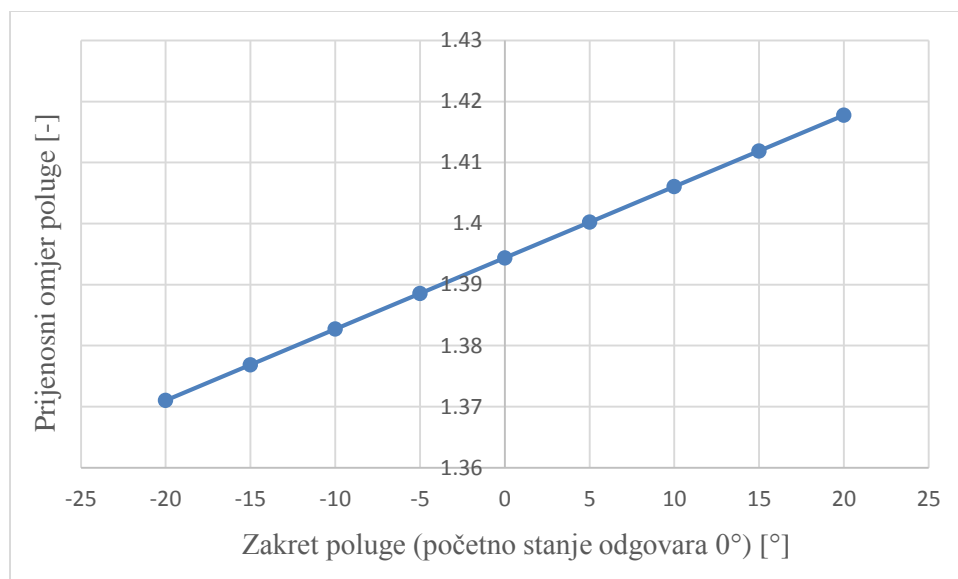
$$f_R = \tan \psi_{Z1} + \tan \psi_{Z2} = 0,048 \quad (44)$$

Dobiveni prijenosni omjer poluge je:

$$R_R = R_{RL} \cdot R_{R\psi} \cdot (1 + f_R \cdot \theta) = 1,4 \cdot 0,996 \cdot (1 + (0,048 \cdot 0)) = 1,394 \quad (45)$$

Ukupni prijenosni omjer R_D :

$$R_D = R_S \cdot R_R = 0,4 \cdot 1,394 = 0,55 \quad (46)$$

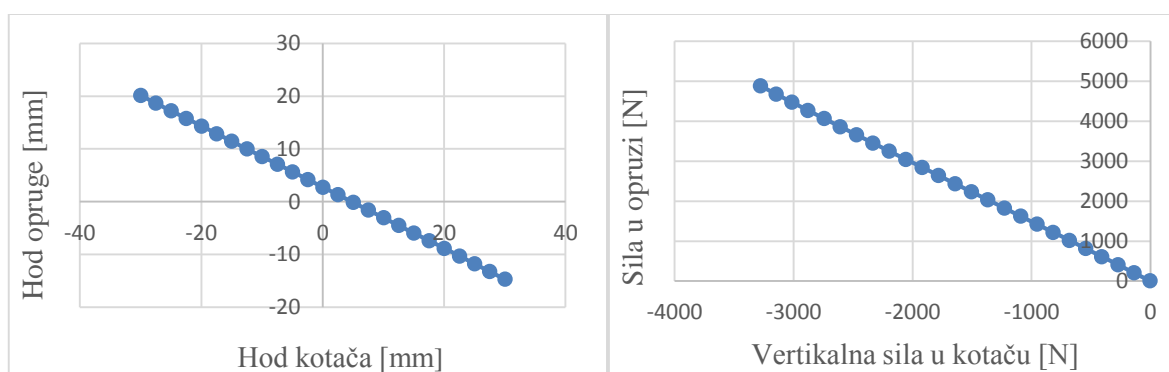


Slika 9. Promjena iznosa prijenosnog omjera poluge u ovisnosti o zakretu poluge

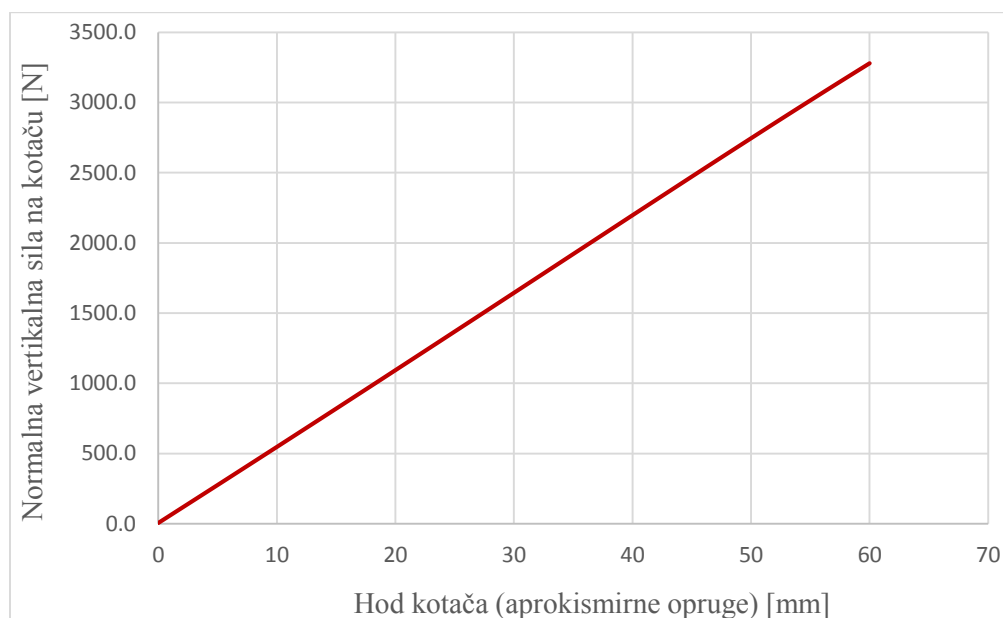
Iako je prilikom zakret poluge u smjeru kazaljke na satu za iznosi od $\theta = 15^\circ$ kao i u obrnutom smjeru od kazaljke na satu za iznos $\theta = -10^\circ$ prijenosni omjer poluge R_R promjenjiv za ovu svrhu koristit će se prijenosni omjer za položaj poluge u neutralnom položaju.

4. Definiranje karakteristike opruge svedene na kotač

Za definiranje opruge koristi se programski paket *Lotus suspension anaysis* preko kojeg se definiranjem točaka ovjesa može dobiti ovisnost pomaka opruge i sile u opruzi o podizanju (spuštanju) kotača. Za određivanje krutosti opruge izvlače se ovisnosti pomaka kotača u ovisnosti o pomaku opruge kao i ovisnost sile na mjestu dodira kotača i podloge u ovisnosti o sili u opruzi za zadanu karakteristiku opruge kao i njena početna duljina. Navedeni dijagrami prikazani su na slici 10. Spajanjem karakteristike hoda kotača i sile na kotaču dobije se karakteristika opruge na kotaču.

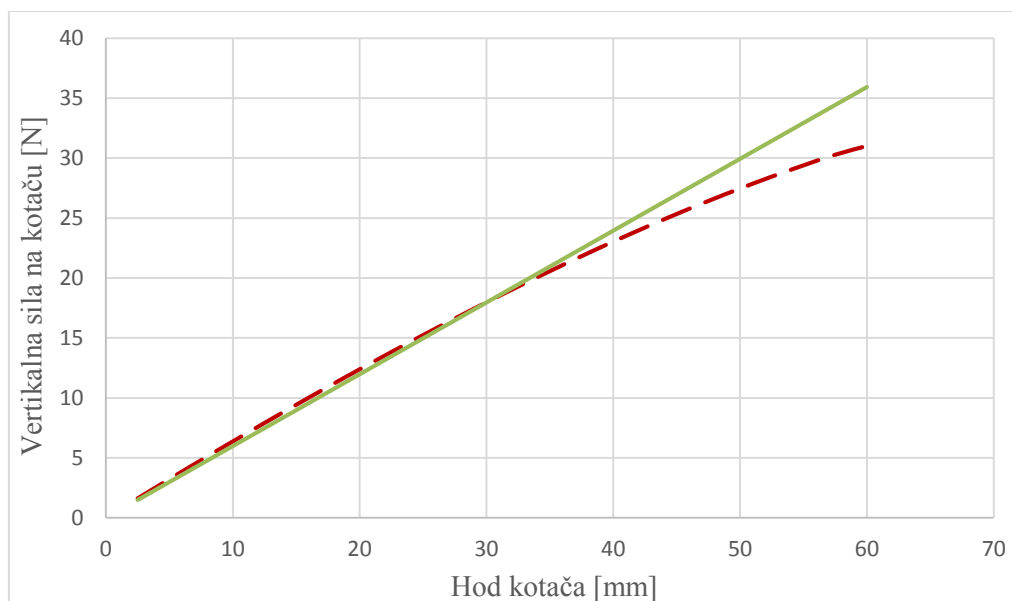


Slika 10. Karakteristika opruge u ovisnosti o pomaku i sili na kotaču



Slika 11. Karakteristika opruge na prednjem kotaču dobivena iz dijagram na slici 10.

Na slici 11. prikazana je aproksimirana karakteristika opruge u ravnini kotača. Hod kotača (aproksimirane opruge) od iznosa nula predstavlja oprugu neopterećene dužine.

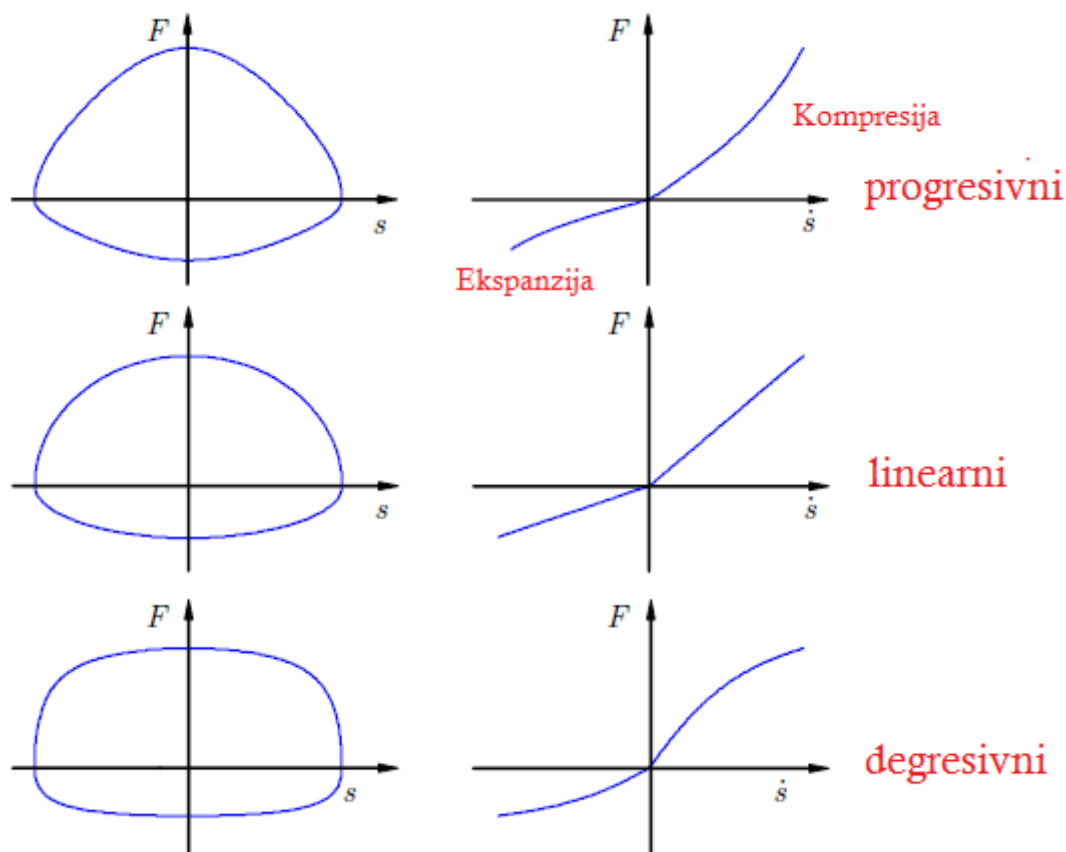


Slika 12. Karakteristika opruge na stražnjem kotaču

Stvarna karakteristika opruge postavljena u ravnini kotača prikazana je na slici 12. kao isprekidana crvena linija. Razlog nelinearne karakteristike opruge u ravnini kotača za linearnu stvarnu karakteristiku leži u promjenjivom prijenosnom omjeru u ovisnosti o hodu kotača. Puna linija sa slike 12. definira karakteristiku opruge u ravnini kotača za prijenosni omjer poluge definiran za položaj kotača na neutralnoj visini. Zbog male razlike u promjeni nagiba koristit će se karakteristika opruge sa konstantnim nagibom (pravac pune linije sa slike 12.).

5. Određivanje karakteristike amortizera

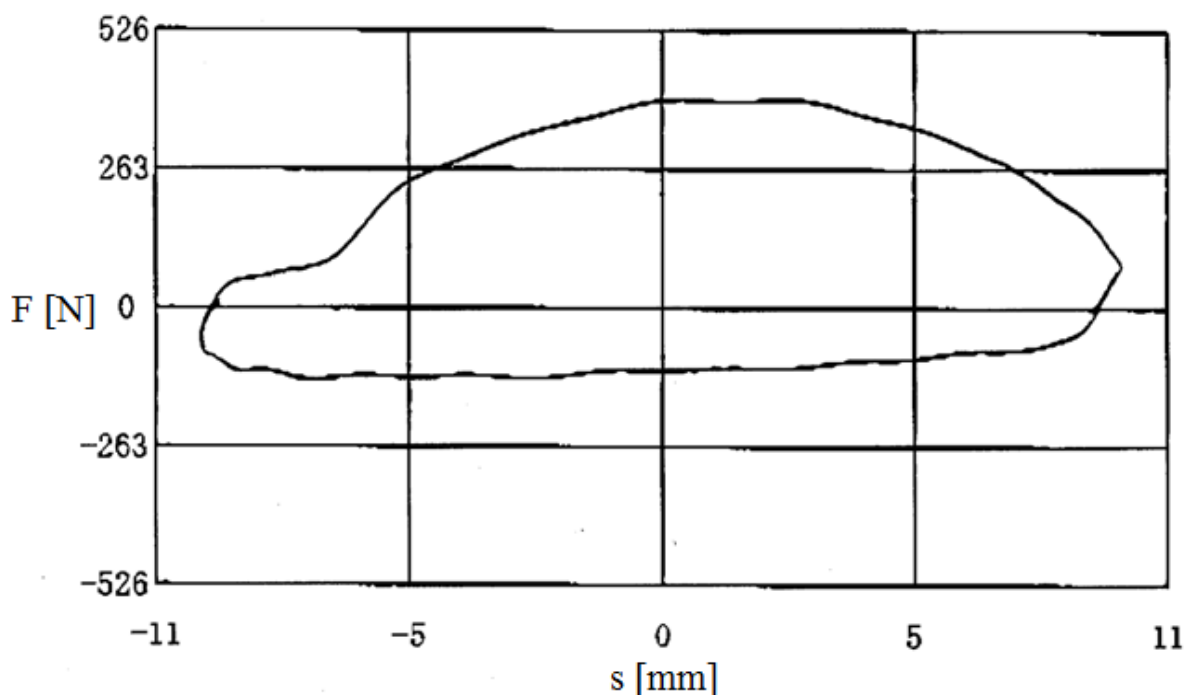
Karakteristika amortizera, prikazuje se najčešće pomoću dva sljedeća karakteristična dijagrama. Ovisnost sile u amortizeru o hodu klipa i ovisnosti (promjeni) sile o brzini kompresije klipa. Slika 13. prikazuje tri karakteristična oblika karakteristike amortizera progresivni, linearni i degresivni.



Slika 13. Tri vrste amortizera sa prikazom karakteristikom u dijagramu sila/hod klipa (lijevo), sila/brzina kretanja klipa (desno)[3]

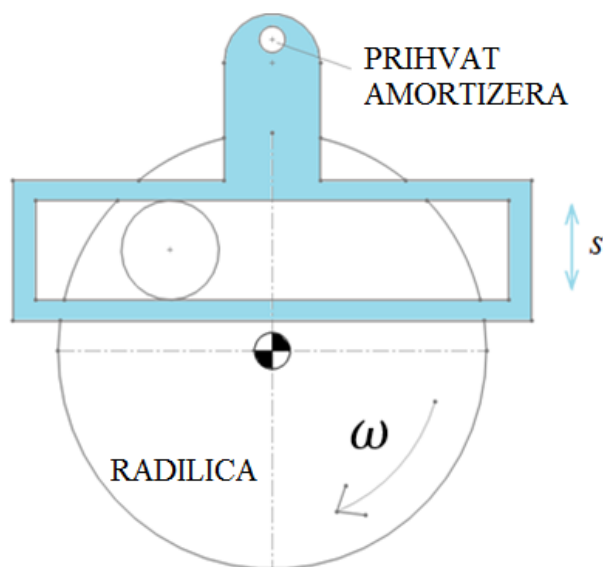
Za definiranje karakteristike amortizera u CarSim-u potrebno je unijeti krivulju ovisnosti sile o brzini gibanja klipa amortizera. Amortizer korišten u vozilu formule student Arctos marke DNM naziva MM-20AR ima karakteristiku prikazanu na slici 14.

Ispitivanjem amortizera na ispitnom stolu dobije se dijagram ovisnosti o hodu klipa kako je prikazano na slici 14. Sam izgled krivulje amortizera sa slike 13. (lijevo) daje uvid u kvalitetu izrade amortizera, definirane simetričnošću oko ordinate (F), kao i samog tipa amortizera (progresivni, degresivni ili linearni).



Slika 14. Karakteristika amortizera snimljena na ispitnom stolu, na apscisi je označen hod amortizera ± 10 mm, a na ordinati iznos sile u [N] [4]

Na slici 14. prikazan je karakteristika amortizera dobivena na ispitnom uređaju gdje se na apscisi nalazi prijeđeni put klipa amortizera, a na ordinati sila. Za dobivanje dijagrama ovisnosti brzine o sili potrebno je razmotriti način rada ispitnog uređaja. Na slici 15. prikazan je pojednostavljeni opis uređaja za mjerenje karakteristike amortizera. Za definiranje amortizera potrebno je unijeti karakteristiku amortizer koja djeluje u ravni kotača. Za dobivanje karakteristike na kotaču potrebno je prvo odrediti pravu karakteristiku amortizera (Slika 14) te pomoću poznatog prijenosnog omjera izvući karakteristiku na kotaču. Određivanje stvarne karakteristike amortizera potrebno je da se u potpunosti definira vozilo. Iako je podešavanje amortizera moguće, korišten je model sa najmanjom otvorenosti ventila amortizera koji ujedno daje i najveću prigušnu silu. Sama kvaliteta amortizera vidi se na slici 17. te će se objasniti kasnije u tekstu.



Slika 15. Princip rada uređaja za testiranje karakteristike amortizera

Radilica radijusa r rotira konstantnom kutnom brzinom ω koja preko sinusne funkcije daje karakteristiku brzine klipnjače prema formuli

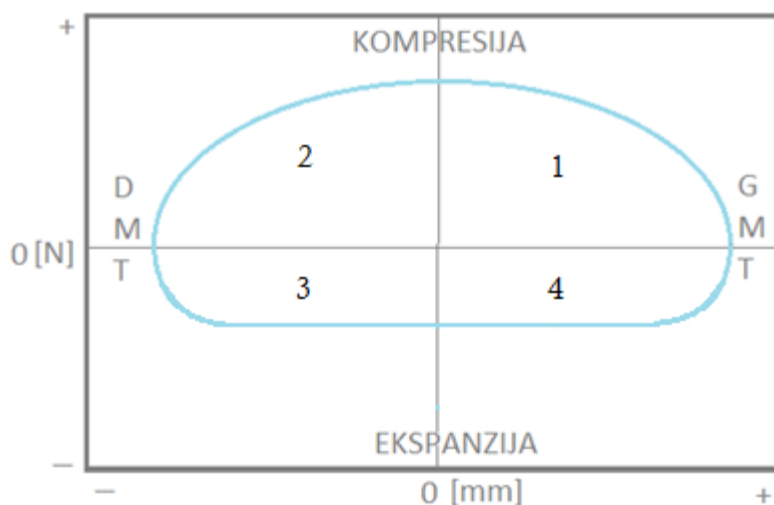
$$v = r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha) \text{ [m/s]} \quad (47)$$

gdje je

α - kut zakreta radilice.

Navedeni način testiranja najčešće se koristi zbog svoje jednostavnosti, konstantom kutnom brzinom radilice preko opisanog mehanizma dobiva se raspon brzina od maksimalne kod $\sin(90^\circ) = 1$ i $\sin(270^\circ) = -1$ do minimalne ($v = 0 \text{ mm/s}$) kod $\sin(0^\circ)$ i $\sin(180^\circ)$.

Dijagram na slici 8. može se raspodijeliti na četiri kvadranta kako je prikazan na slici 10.



Slika 16. Prikaz elemenata dijagrama dobivenog ispitivanjem amortizera na ispitnom uređaju

Kako je prikazano na slici 16. dijagram predstavlja kompresiju i ekspanziju amortizera, u prvom kvadrantu prikazana je kompresija amortizera prilikom ubrzanja dok je u drugom kvadrantu prikazana kompresija prilikom usporenja klipa amortizera. Treći i četvrti kvadranti predstavljaju ubrzanje i usporenje klipa pri ekspanziji amortizera.

Da bi se karakteristika amortizera mogla primijeniti u programskom paketu CarSIM potrebno je dobiti dijagram ovisnosti brzine kretanja klipnjače amortizera o sili.

Poznajući radijus radilice ($r = 10 \text{ mm}$) i maksimalnu brzinu dobivenu ispitivanjem $v = 151 \text{ mm/s}$ može se izračunati kutna brzina radilice preko pozicije radilice odmaknute 90° od početnog položaja ($\sin(90^\circ) = 1$):

$$\omega = \frac{v}{r \cdot \sin(90^\circ)} = \frac{151}{10 \cdot 1} = 15,1 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (48)$$

Poznavanjem kutne brzine moguće je za svaki položaj radilice odrediti brzinu gibanja klipnjače amortizera:

$$v = r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha) \text{ [m/s]} \quad (49)$$

u kojem se kut (α) određuje u ovisnosti o pomaku klipnjače:

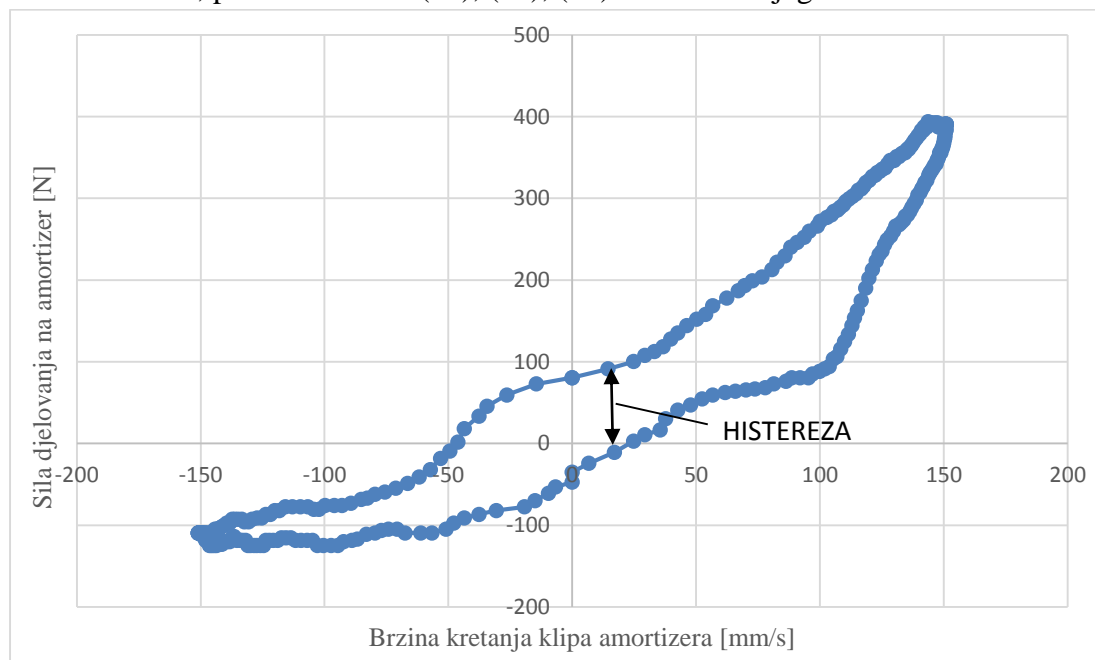
$$\cos(\alpha) = \frac{x}{r} \quad (50)$$

gdje je:

x - udaljenost prihvata klipnjače od centra radilice [mm],

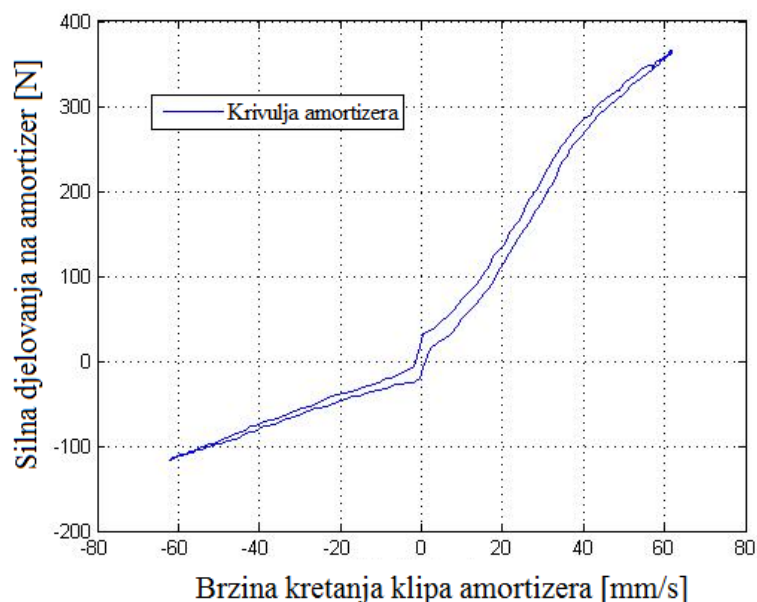
r - radijus radilice [mm].

Izvlačenjem točaka iz dijagrama sa slike 14., te određivanjem brzine kretanja klipnjače u ovisnosti o sili, prema izrazima (48), (49), (50) dobiva se dijagram na slici 17.



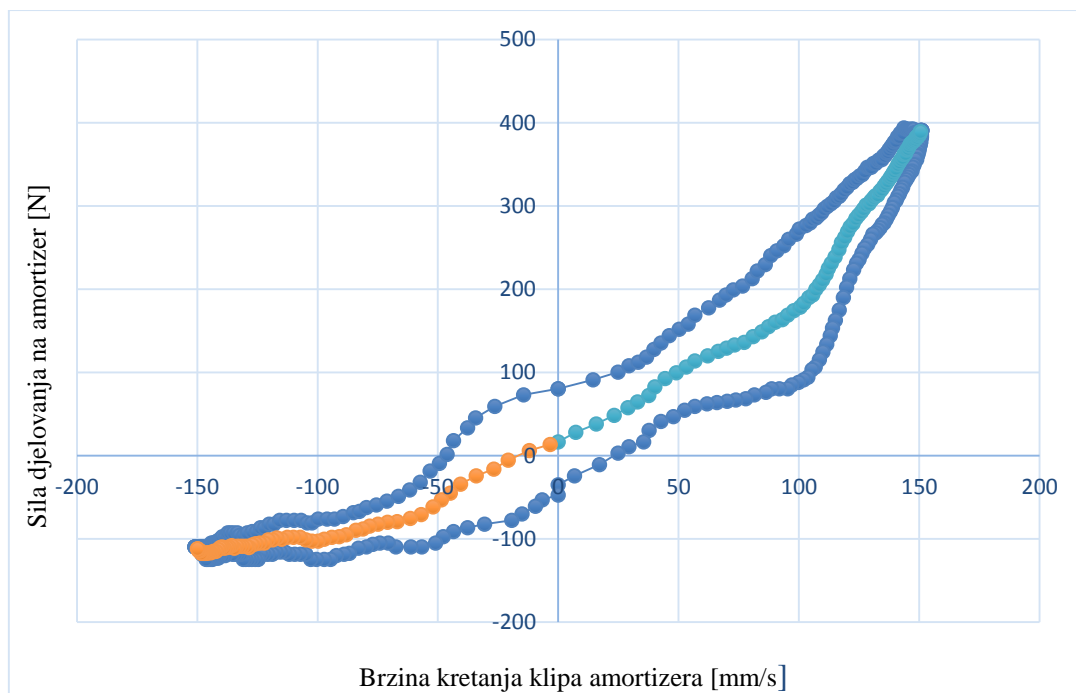
Slika 17. Karakteristika amortizera u dijagramu ovisnosti brzine kretanja klipa o sili

Dijagram brzina/sila koristan je za određivanja kvalitete amortizera. Kvalitetan amortizer će proizvesti trag sa malim razmakom histereze između krivulje kompresije/ekspanzije prilikom ubrzanja i usporjenja. Kako se može vidjeti na slici 17. iznos histereze za analizirani amortizer (DNM MM 20 AR) je relativno velik te govori o kvaliteti samog amortizera. Što je iznos histereze veći to je amortizer lošije kvalitete, prikaz kvalitetnog amortizera vidi se na slici 18.



Slika 18. Prikaz karakteristike kvalitetno izrađenog amortizera

Za karakteristiku amortizera sa slike 17. izvlači se krivulja srednje vrijednosti sa kojom se ulazi u izračun karakteristike amortizera u ravni kotača.



Slika 19. Srednja vrijednost krivulje karakteristike amortizera

5.1. Karakteristika amortizera na kotaču

Nakon određivanja prijenosnog omjera poluge R_R te definiranja krivulje karakterisitke amortizera potrebno je odrediti krakteristiku amortizera u uzdužnoj ravnini kotača okomitoj na tlo.

Za izračun krivulje koristi se programski paket Matlab. Dobivene točke potrebno je unijeti u matričnom zapisu i kao takve iskoristiti za određivanje funkcije polinoma određenog reda koji najbolje opisuje zadane točke.

Koristeći funkcije „polyfit“ i „polyval“ unesene točke krivulje definiraju se preko funkcije polinoma. Polinom krivulje amortizera može biti izražen preko jednadžbe

$$F_D = C_0 + C_1 \cdot v_D + C_1 \cdot v_D^2 + C_1 \cdot v_D^3 + \dots + C_r \cdot v_D^r \text{ [N]} \quad (51)$$

nakon ubacivanja karakterističnih točaka za polinom trećeg stupnja dobiju se koeficijenti polinoma.

$$C_3 = -0,0001; C_2 = 0,022; C_1 = 0,4353; C_0 = 83,5217$$

gdje polinom iz izraza (51) poprima oblik:

$$F_D = 83,5217 + 0,4353 \cdot v_D + 0,022 \cdot v_D^2 + (-0,0001) \cdot v_D^3 \text{ [N]} \quad (52)$$

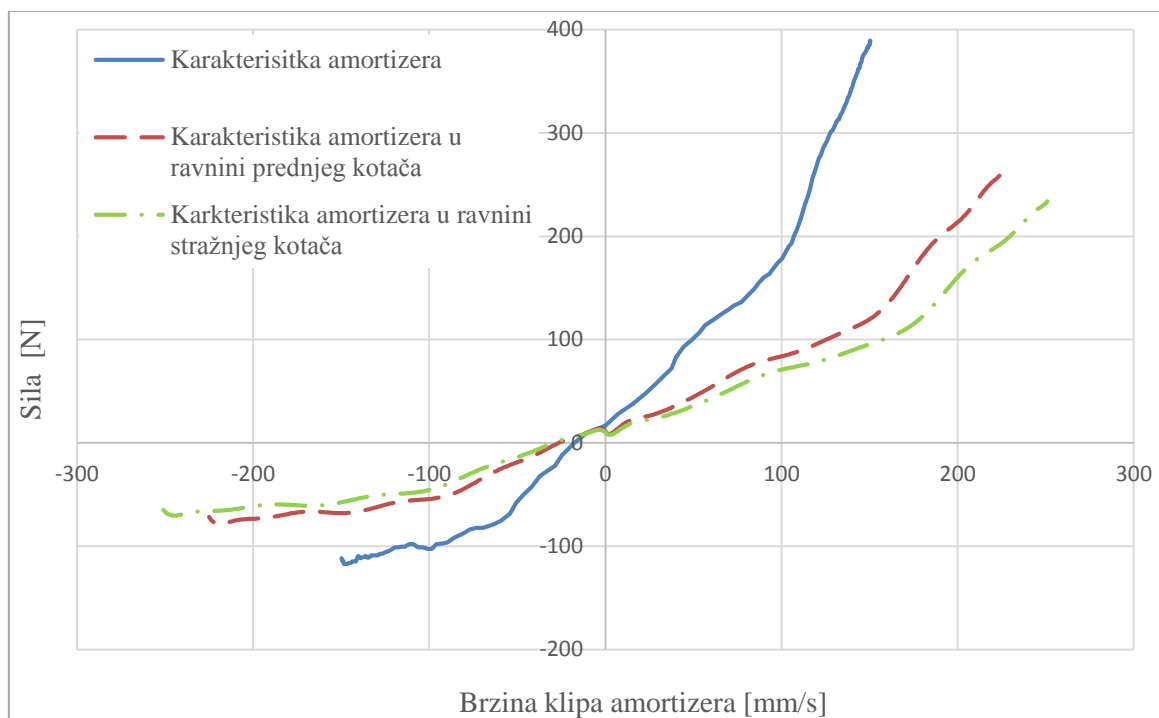
Definiranim prijenosnim omjerom za poziciju poluge kod normalne visine vožnje $R_R = 1,426$ dobiva se konačna karakterisitka amortizera na kotaču preko izraza (38):

$$R_D = R_S \cdot R_R = 0,67 \text{ [N]} \quad (53)$$

$$F_{DW} = R_D C_0 + C_1 R_D^2 v_S + C_1 R_D^3 v_D^2 + C_1 R_D^4 v_D^3 \text{ [N]} \quad (54)$$

$$F_{DW} = 0,67 \cdot 83,52 + 0,4353 \cdot 0,67^2 \cdot v_D + 0,022 \cdot 0,67^3 \cdot v_D^2 + (-0,0001) \cdot 0,67^4 \cdot v_D^3 \text{ [N]} \quad (55)$$

Dobivene krivulje prikazane su u dijagramu na slici 20. Stražnji amortizer preko poluge prijenosnog omjera $R_D = 0,55$ daje drugačiju karakteristiku prikazanu na slici 20.



Slika 20. Prikazana karakteristika prednjeg i stražnjeg amortizera (plavo) i njihova odgovarajuća karakteristika u ravnini kotača

6. Opružna karakteristika ovjesa

Opružna karakteristika sustava ovjesa (opruga i guma u serijskom spoju) (engl. *Ride rate*) kao i ekvivalentna karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) koja dolazi do izražaja prilikom naginjanja vozila kod bočnog ubrzanja, utječu na zakretanje ovješene mase vozila oko uzdužne osi vozila.

Izračun opružnih karakteristika sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) i karakteristike bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) je neophodan dio u razumijevanju postavki trkaćeg vozila te direktno utječu na promjenu opterećenja kotača sa promjenom pozicije šasije bolida.

Iznos opružne karakteristike sustava (engl. *Ride rate*) odnosi se na promjenu vertikalne sile na kotaču za svaki zavoj zasebno u ovisnosti o čistoj vertikalnoj promjeni visine šasije bolida. Karakteristika bočnog naginjanja vozila (engl. *Roll rate*) se odnosi na iznos momenta koji se odupire naginjanju uslijed promjene vertikalne sile na kotaču. Izračun opružnih karakteristika sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) za individualni kotač vozila je izražen u iznosu vertikalne sile na kotaču u ovisnosti o vertikalnom pomaku šasije bolida ili kotača.

Za određivanje opružne karakteristike sustava (engl. *Ride rate*) može se krenuti sa željenom neprigušenom frekvencijom ili sa maksimalnim pomakom kotača i maksimalnim opterećenjem. U oba slučaja određuje se koliko će kruta ili mekana biti vožnja i držanje na cesti [1]. Općenito je poželjno imati što mekši ovjes uzimajući u obzir aerodinamično opterećenje, sile u zavoju i krutost naginjanja bolida oko poprečne osi. U konačnici iznosi opružne karakteristike ovjesa (engl. *Ride rate*) baziraju se na opterećenju kotača vozila i mogućeg hoda kotača. Međutim za određivanje opterećenja na kotačima potrebno je poznavati iznose promjene opružnih karakteristika ovjesa (engl. *Ride rate*) i bočnog naginjanja vozila (engl. *Roll rate*) što rezultira tipičnim konstrukcijskim problemom iz razloga što jedan ovisan o drugome. Stoga je potrebno napraviti početnu pretpostavku te nastaviti sa iteracijom dok se ne dođe do razumnog rješenja problema.

Prilikom proračuna iznosa promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) i karakteristike bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) potrebno je postaviti određene uvjete koji se odnose na područje primjene bolida formula student. Slučaj za koji će se računati navedene karakteristike odnosit će se na zavoj osmice radijusa $r = 9,125$ m koji vozilo prolazi brzinom od $v = 42$ km/h (11,66 m/s) što će dati bočno ubrzanje vozila od $a_\alpha = 1,5$ g. Sljedeća pretpostavka je da je vozilo simetrično s obzirom na poprečnu os kao i da je neovisan ovjes za svaki kotač.

Bolid je definiran osnovnim karakteristikama:

Težine na svakom kotaču i na pojedinoj osovini:

$$W_1 = 750,17 \text{ N}$$

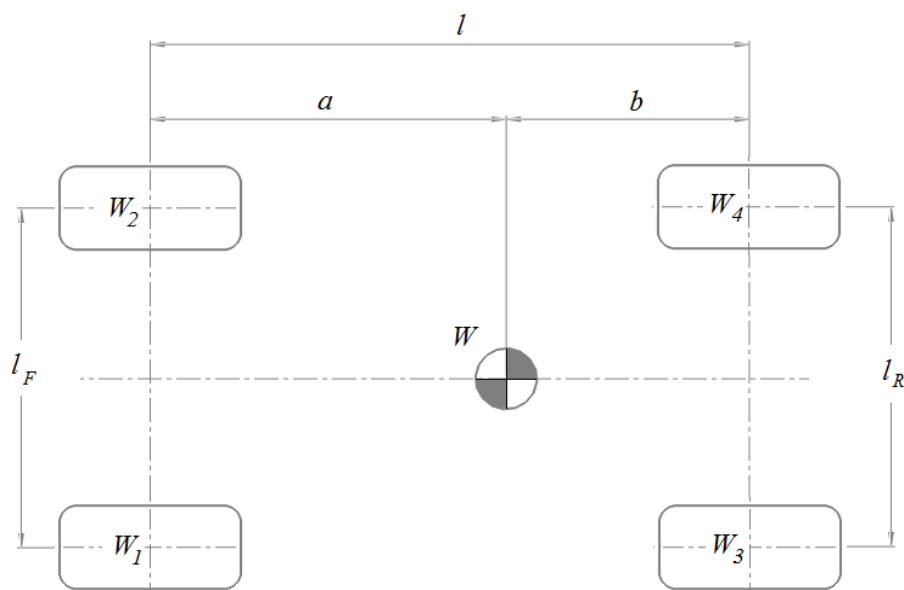
$$W_2 = 750,17 \text{ N}$$

$$W_F = 1500,34 \text{ N}$$

$$W_3 = 820 \text{ N}$$

$$W_4 = 820 \text{ N}$$

$$W_R = 1640 \text{ N}$$



Slika 21. Osnovne dimenzije vozila

Dimenzije: $l_F = 1310 \text{ mm}$ $l_R = 1250 \text{ mm}$ $l = 1600 \text{ mm}$
 $h = 320 \text{ mm}$ $H = 232 \text{ mm}$

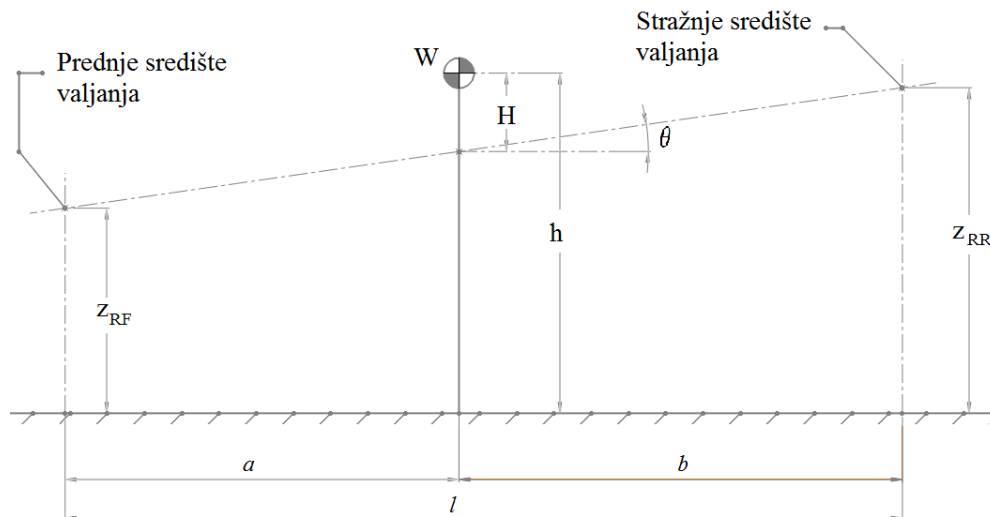
Visina centra valjanja za prednju i stražnju osovinu

$z_{RF} = 90 \text{ mm}$ $z_{RR} = 86 \text{ mm}$

Da bi odredili karakteristiku opruge potrebno je pretpostaviti iznos karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*). Izabrane vrijednosti karakteristike bočnog naginjanja odabiru se tako da gradijent bočnog naginjanja bude između $0,8 - 1 \text{ deg/g}$. Iznos stražnje karakteristike bočnog naginjanja odbire se da bude veći iz razloga što nam je potrebna veća opružna karakteristika kotača na stražnjem ovjesu.

$K_{\phi_F} = 20\,000\,000 \text{ Nmm/rad}$

$K_{\phi_R} = 25\,000\,000 \text{ Nmm/rad}$



Slika 22. Bočni prikaz vozila i dimenzije odgovarajućih značajki

Iz razloga što su iznosi promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) nepoznati također su nam nepoznati i iznosi promjene karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) zbog međusobne ovisnosti, stoga je za početak potrebno pretpostaviti iznos promjene karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*).

Za proračun je potrebno poznavati iznos bočnog ubrzanja, koji se izračunava preko pretpostavljenih uvjeta ulaska vozila u zavoj.

$$a_{\alpha} = \frac{v^2}{r \cdot g} = \frac{11,66^2}{9,125 \cdot 9,81} = 1,52 \text{ [g]} \quad (56)$$

Gradijent bočnog naginjanja iznosi

$$\frac{\phi}{a_{\alpha}} = \frac{-W \cdot H}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} = \frac{-3140,34 \cdot 232}{20\,000\,000 + 25\,000\,000} = 0,0163 \frac{\text{rad}}{\text{g}} = 0,927 \text{ [deg/g]} \quad (57)$$

Potom se kreće u izračun prijenosa opterećenja na vanjske kotače uslijed bočnog ubrzanja:

prednji:

$$W_F = a_{\alpha} \cdot \frac{W}{t_F} \cdot \left(\frac{H \cdot K_{\phi F}}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} + \frac{b}{l} \cdot z_{RF} \right) \quad (58)$$

$$W_F = -1,52 \cdot \frac{3140,34}{1310} \cdot \left(\frac{232 \cdot 20\,000\,000}{20\,000\,000 + 25\,000\,000} + \frac{764,42}{1600} \cdot 90 \right) = -532,5 \text{ N}$$

i stražnji:

$$W_R = a_{\alpha} \cdot \frac{W}{t_R} \cdot \left(\frac{H \cdot K_{\phi R}}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} + \frac{a}{l} \cdot z_{RR} \right) \quad (59)$$

$$W_R = -1,52 \cdot \frac{3140,34}{1250} \cdot \left(\frac{232 \cdot 25\,000\,000}{20\,000\,000 + 25\,000\,000} + \frac{835,57}{1600} \cdot 86 \right) = -663,8 \text{ N}$$

Dobivene vrijednosti potom se primjenjuju za izračun promjene opterećenja uslijed ulaska vozila u zavoj. Iz razloga što staza nema bočni nagib promjena opterećenja odgovara prijenosu opterećenja uslijed prolaska kroz zavoj:

prednji: $W_{FO} = W_F = 532,5 \text{ N}$
 $W_{FI} = W_F = -532,5 \text{ N}$

stražnji:

$$W_{RO} = W_R = 663,8 \text{ N}$$

$$W_{RI} = W_R = -663,8 \text{ N}$$

Sljedeći korak je odabir promjene iznosa opružnih karakteristika sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) koji su kompatibilni sa ovim promjenama opterećenja kotača u zavoju. Prilikom odabira karakteristike opruge potrebno je voditi računa o tome da prilikom hoda kotača prema gore (uslijed naginjanja bolida prema van u zavoju) ne dolazi do udaranja klipa amortizera u graničnik pri čemu dolazi do destabilizacije vozila. Minimalni potrebni hod kotača koji konstrukcija treba omogućiti iznosi $\pm 25 \text{ mm}$. Mjerenjem na postojećem bolidu FSB Arctos dobiveni su iznosi mogućeg hoda kotača od $\pm 30 \text{ mm}$.

Prednji i stražnje karakteristike stupnja promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) je iznos promjene opterećenja na kotaču podijeljen s hodom kotača.

$$K_{RF} = \frac{532,5}{30} = 17,75 \text{ N/mm} \quad (60)$$

$$K_{RR} = \frac{663,8}{30} = 22,13 \text{ N/mm} \quad (61)$$

Uzimajući u obzir simetriju vozila u odnosu na uzdužnu os vozila (lijeva i desna strana), moguće je izračunati neprigušenu frekvenciju vozila:

$$\omega_F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{RF} \cdot 1000 \cdot 9,81}{W_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{17,75 \cdot 1000 \cdot 9,81}{750,17}} = 2,42 \text{ Hz} \quad (62)$$

$$\omega_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{RR} \cdot 1000 \cdot 9,81}{W_4}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{22,13 \cdot 1000 \cdot 9,81}{820}} = 2,59 \text{ Hz} \quad (63)$$

Prema preporuci iz literature [5] kod vozila sa stražnjim pogonom neprigušena frekvencija vozila prednje osovine je niža od stražnje. Iz dobivenih rezultata može se vidjeti da je neprigušena frekvencija prednje osovine niža, ali ju je potrebno smanjiti da iznos bude manji za 10 – 20 % od stražnje. Za FSAE vozila prema izvoru [5] preporuka je da se neprigušene frekvencije kreću u rasponu od 2 do 2,5 Hz..

Za izračun nove karakteristike opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) potrebno je naći omjer nove i stare neprigušene frekvencije ovjesa:

$$\frac{\omega_{Rnovi}}{\omega_{Rstari}} = \left(\frac{1,1 \cdot 2,42}{2,59} \right)^2 = 1,061 \quad (64)$$

iz čega slijede novi iznosi promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*)

$$K_{RR} \cdot 1,013 = 22,13 \cdot 1,061 = 23,47 \text{ N/mm} \quad (65)$$

novi iznos neprigušenih frekvencije ovjesa

$$\omega_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{RR} \cdot 1000 \cdot 9,81}{W_4}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{23,47 \cdot 1000 \cdot 9,81}{820}} = 2,66 \text{ Hz} \quad (66)$$

Iz čega slijedi određivanje iznosa promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) i usporedbe istih s početnim odabranim vrijednostima.

$$K_{\phi F} = \frac{K_{RF} \cdot t_F^2}{2} = \frac{17,75 \cdot 1310^2}{2} = 15\,230\,025 \text{ Nmm/rad} \quad (67)$$

$$K_{\phi R} = \frac{K_{RR} \cdot t_R^2}{2} = \frac{23,47 \cdot 1250^2}{2} = 18\,341\,757 \text{ Nmm/rad} \quad (68)$$

Gradijent bočnog nagninjanja potom iznosi:

$$\frac{\phi}{a_\alpha} = \frac{-W \cdot H}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} = \frac{-3140,34 \cdot 232}{15\,230\,025 + 18\,341\,757} = 0,0217 \frac{\text{rad}}{\text{g}} = 1,243 \text{ deg/g} \quad (69)$$

Novo dobiveni prijenos mase na prednjoj osovini iznosi:

$$W_F = a_\alpha \cdot \frac{W}{t_F} \cdot \left(\frac{H \cdot K_{\phi F}}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} + \frac{b}{l} \cdot z_{RF} \right) \quad (70)$$

$$W_F = -1,52 \cdot \frac{3140,34}{1310} \cdot \left(\frac{232 \cdot 15\,230\,025}{15\,230\,025 + 18\,341\,757} + \frac{764,42}{1600} \cdot 90 \right) = -540,17 \text{ N}$$

i stražnjoj osovini:

$$W_R = a_\alpha \cdot \frac{W}{t_R} \cdot \left(\frac{H \cdot K_{\phi R}}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} + \frac{a}{l} \cdot z_{RR} \right) \quad (71)$$

$$W_R = -1,52 \cdot \frac{3140,34}{1250} \cdot \left(\frac{232 \cdot 18\,341\,757}{15\,230\,025 + 18\,341\,757} + \frac{835,57}{1600} \cdot 86 \right) = -655,5 \text{ N}$$

Prednji i stražnji: $W_{FO} = W_F = 540,17 \text{ N}$

$$W_{RO} = W_R = 655,5 \text{ N}$$

Sabijanje opruge uslijed opisanog nagninjanja:

$$\delta_F = 540,17/17,75 = 30,43 \text{ mm} \quad (72)$$

$$\delta_R = 655,5/23,47 = 27,92 \text{ mm} \quad (73)$$

Proces je potrebno iterirati dok se ne dobije ciljana vrijednost neprigušene frekvencije i iznosa promjene bočnog nagninjanja.

Tablica 1. Proces iteriranja opružne karakteristike sustav ovjesa (engl. Ride rate)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Iteracija	$K_{\phi F}$ Nmm/rad	$K_{\phi R}$ Nmm/rad	ϕ/a_α deg/g	K_{RF} N/mm	K_{RR} N/mm	ω_F Hz	ω_R Hz	δ_F mm	δ_R mm	ω_R Hz	K_{RR} N/mm
1	20 000 000	25 000 000	0,927	17,75	22,13	2,42	2,59	30	30	2,66	23,47
2	15 230 025	18 341 757	1,243	18,01	21,85	2,44	2,57	30,43	27,92	2,68	23,82
3	15 453 693	18 610 551	1,225	18,01	21,85	2,44	2,57	30	27,52	2,68	23,82
4	15 453 693	18 610 551	1,225	18,01	21,85	2,44	2,76	30	27,52	2,68	23,82

Postupak iteriranja kreće se pretpostavljenim vrijednostima karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) prikazanih u 1. i 2. stupcu u tablici 1. Preko odabranih vrijednosti karakteristika bočnog naginjanja za prednju i stražnju osovinu određuje se gradijent bočnog naginjanja vozila (3. stupac). Iznosi karakteristike bočnog naginjanja koriste se i za određivanje opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) (3. i 4. stupac) te se pomoću dobivenih opružnih karakteristika sustava ovjesa određuje frekvencija neprigušenih vibracija prednje i stražnje osovine (6. i 7. stupac). Dobivene vrijednosti iz 4. i 5. stupca koriste se za određivanje ukupnog hoda kotača prilikom opterećenja koje vozilo savladava prolaskom kroz zavoj sa bočnim ubrzanjem iznosa 1,4 g. Prema preporuci [5] da neprigušena frekvencija stražnje osovine bude veća za 10 – 20 % od prednje dobiva se iznos neprigušene frekvencije stražnjeg ovjesa (10. stupac), a potom se određuje vrijednost stražnje opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*). Pretpostavljene vrijednosti 1. i 2. stupca moguće je izračunati preko dobivenih vrijednosti opružnih karakteritika sustava ovjesa (engl. *Ride rate*). Proces se ponavlja sve dok se novo dobivene vrijednosti ne podudaraju sa vrijednostima prethodne iteracije za 1. i 2. stupac.

6.1. Prebacivanje opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) na centar kotača

Ukupni iznosi opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) može se smatrati kao serijski spoj opruga od kojih je jedna opruga između centra kotača i šasije, a druga opružna karakteristika gume. Opća formula za opruge spojene u seriju iznosi:

$$\frac{1}{S_{uk}} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \left[\frac{1}{\text{N/mm}} \right] \quad (74)$$

U navedenom slučaju poznat je iznos ukupne opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) i opružne karakteristike koja sačinjava jednu od dvije opruge sustava. Sljedeća jednadžba daje karakteristiku opruge koja djeluje između centra kotača i šasije.

$$K_W = \frac{K_R \cdot K_T}{K_T - K_R} \text{ [N/mm]} \quad (75)$$

K_W – karakteristika opruge između centra kotača i šasije, N/mm

K_R – opružna karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*), N/mm

K_T – opružna karakteristika gume, N/mm

Uzimajući u obzir opružnu karakteristiku gume od 175 N/mm [6] rezultirajući iznosi promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) za prednji i stražnji kotač glasi:

$$K_{WF} = \frac{K_{RF} \cdot K_T}{K_T - K_{RF}} = \frac{18 \cdot 175}{175 - 18} = 20 \text{ N/mm} \quad (76)$$

$$K_{WR} = \frac{K_{RR} \cdot K_T}{K_T - K_{RR}} = \frac{23,82 \cdot 175}{175 - 23,82} = 27,5 \text{ N/mm} \quad (77)$$

Iznos promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) na centru kotača je veći nego promjena iznosa opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) cijelog kotača, znači da je karakteristika opruge na samom kotaču kruća nego opružna karakteristika cijelog sustava ovjesa (opruža plus kotač).

Dobivene karakteristike iznosa opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) iz tablice 1. se mogu primijeniti za izračun konačne opružne karakteristike između centra kotača i šasije, koja se razlikuje od prave karakteristike opruge za iznos prijenosnog omjer potisne šipke i klackalice. Poznaajući opružnu karakteristiku na centru kotača kao i opružnu karakteristiku gume možemo odrediti potreban iznos promjene karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) koju je potrebno nadoknaditi stabilizacijskom šipkom (engl. *Anti roll bar*). Iz tablice 1. dobiveni iznos gradijenta bočnog naginjanja iznosi $\phi/a_\alpha = 1,2254 \text{ deg/g}$. Dobiveni iznosi karakteristike iznosa promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) i odgovarajuća frekvencija, 2,44 Hz za prednji i 2,68 Hz za stražnji ovjes odgovaraju preporučenim iznosima za FSAE vozilo [Milliken]. Dobiveni iznos karakteristike iznosa promjene opružne karakteristike sustava ovjesa (engl. *Ride rate*) daju gradijent bočnog naginjanja 1,225 deg/g što prekoračuje preporučene vrijednosti za FSAE vozilo od 0,8-1 deg/g. [1]. Smanjenje gradijenta bočnog naginjanja moguće je izvesti na dva načina. Prvi način je

povećanjem krutosti opruge a samim tim i iznosa karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*), međutim povećanjem istog dolazi do povećanja i neprigušene frekvencije ovješene mase kako se vidi iz izraza (66), što utječe na kontakt kotača sa podlogom prilikom prelaska preko neravnine te posljedično i samog držanja vozila. Drugi način kojim se može smanjiti gradijent bočnog naginjanja je ugradnja stabilizatora (engl. *Anti roll bar*) koji bi nadoknadio iznos promjene karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*), a da pritom ne utječe na povećanje neprigušene frekvencije vozila. Iz jednadžbe [72] određuje se dodatni iznos promjene karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*) koji će se ostvariti pomoću stabilizacijske šipke (engl. *Anti roll bar*). Preporučeni iznos gradijenta bočnog naginjanja za FSAE vozilo od 0,8 do 1 deg/g odgovara prvo iteracija iz tablice 1. stoga će se primijeniti iznosi karakteristika bočnog naginjanja (engl. *Roll rate*):

$$K_{\phi F} = 20\,000\,000 \text{ Nmm/rad i } K_{\phi R} = 25\,000\,000 \text{ Nmm/rad}$$

$$K_{\phi F} = K_{\phi F} = \frac{K_{\phi F} \cdot K_T \cdot t_F^2 / 2}{[K_T \cdot t_F^2 / 2 - K_{\phi F}]} - K_{WF} \cdot \frac{t_F^2}{2} \quad (78)$$

$$K_{\phi F} = \frac{20\,000\,000 \cdot 175 \cdot 1310^2 / 2}{[175 \cdot 1310^2 / 2 - 20\,000\,000]} - 20 \cdot 1310^2 / 2$$

$$K_{\phi F} = 23\,073\,170 - 17\,161\,000 = 5\,912\,170 \text{ Nmm/rad}$$

za stražnji:

$$K_{\phi R} = \frac{K_{\phi R} \cdot K_T \cdot t_R^2 / 2}{[K_T \cdot t_R^2 / 2 - K_{\phi R}]} - K_{WR} \cdot \frac{t_R^2}{2} \quad (79)$$

$$K_{\phi R} = \frac{25\,000\,000 \cdot 175 \cdot 1250^2 / 2}{[175 \cdot 1250^2 / 2 - 25\,000\,000]} - 27,5 \cdot 1250^2 / 2$$

$$K_{\phi R} = 30\,594\,405,6 - 21\,484\,375 = 9\,110\,030,6 \text{ Nmm/rad}$$

Iznosi momenata stabilizacijske šipke (engl. *Anti roll bar*) su:

$$K_{\phi F} = 5\,912\,170 \text{ Nmm/rad} = 103 \text{ Nm/deg} \quad (80)$$

$$K_{\phi R} = 9\,110\,030 \text{ Nmm/rad} = 159 \text{ Nm/deg} \quad (81)$$

7. Izračun odgovarajuće karakteristike amortizera

Za razliku od primijenjenog amortizera iz prije definiranih značajki u ovom poglavlju će se obraditi postupak odabira odgovarajuće karakteristike amortizera i opruge.

Metoda određivanja karakteristike amortizera je kombinacija teorija vibracije i iskustvenih vrijednosti prigušenija za FSAE vozilo.

Ulazni podaci potrebni za određivanje karakteristike amortizera su sljedeći:

Masa vozila $m_v = 241$ kg

Postotak mase na prednjoj osovini $x = 44$ %

Prednja neovješena masa po kotaču $m_{p,no} = 13$ kg

Stražnja neovješena masa po kotaču $m_{s,no} = 14$ kg

Prednji omjer hoda opruge i kotača $MR_p = 1$

Konstanta prednje opruge $K_{WF} = 20$ N/mm

Stražnji omjer hoda opruge i kotača $MR_s = 1$

Konstanta stražnje opruge $K_{WR} = 27,5$ N/mm

Konstanta opruge gume $K_T = 175$ N/mm

Za određivanje karakteristike amortizera potrebno je poznavati konstantu opruge.

Prvi korak kod odabira konstante opruge potrebno je odabrati željenu frekvenciju vožnje koja za bolide FSAE iznosi 2-3 Hz. [2].

Gdje je ovješena masa na prednjem kotaču:

$$m_{p,ov} = 0,44 \cdot (m_{uk} - 2 \cdot m_{p,no} - 2 \cdot m_{s,no}) = 0,44 \cdot (241 - 26 - 28) = 82,28 \text{ kg} \quad (82)$$

Prema izvoru [5] preporuka je da stražnja vozna frekvencija bude 10-20 % veća od prednje kako bi se spriječile vibracije slijed vremenske razlike početka pobude na prednjim i stražnjim kotačima.

Gdje je ovješena masa na stražnja kotaču:

$$m_{s,ov} = 0,56 \cdot (m_{uk} - 2 \cdot m_{p,no} - 2 \cdot m_{s,no}) = 0,56 \cdot (241 - 26 - 28) = 104,72 \text{ kg} \quad (83)$$

Poznavanjem karakteristike opruge može se odrediti kritični koeficijent prigušenja za ovješenu prednju masu prema:

$$C_{k,p} = 2 \cdot \sqrt{K_R \cdot m_{p,ov} \cdot 0,5} \quad (84)$$

gdje je:

$$K_R = \frac{K_{RF} + K_T}{K_{RF} \cdot K_T} \quad (85)$$

koji u ovom slučaju predstavlja ukupnu karakteristiku opruge serijskog spoja opruge na kotaču K_R i elastične karakteristike gume prikazane konstantom opruge K_T .

Za prednju ne ovješenu masu:

$$C_{k.p.no} = 2 \cdot \sqrt{(K_{RF} + K_T) \cdot m_{p.no}} \quad (86)$$

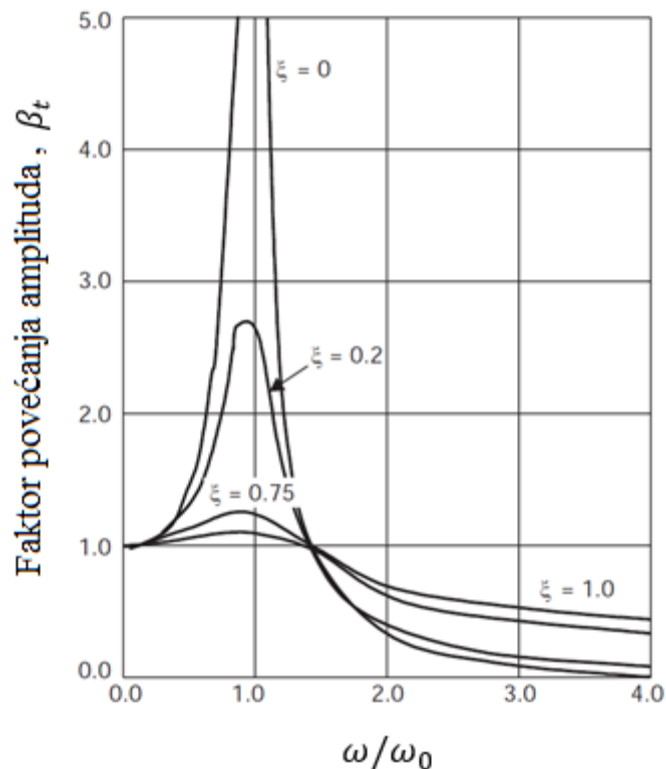
Isti proračun primjenjuje se i za stražnji kraj.

Nakon određivanja kritičnih prigušenja potrebno je odabrati relativni koeficijente prigušenja ζ :

$$\zeta = \frac{C}{C_k} \quad (87)$$

Relativni koeficijent prigušenja utječe na nagib krivulje karakteristike amortizera u dijagramu brzina/sila. Koeficijent prigušenja određuje se za kompresiju pri nižim brzinama koje utječu na kontrolu naginjanja vozila, te višim brzinama koje utječu na ponašanje vozila prilikom prelazaka preko neravnina. Razlog korištenja dva koeficijenta prigušenja je taj što se jedan amortizer koristi za kontroliranje dvije mase (ovješene i ne ovješene) te kontrola rezonantne frekvencije kao i prijenos težine vozila.

Na slici 23. prikazan je dijagram ovisnost faktora povećanja o omjeru frekvencije (trenutne frekvencije i neprigušene frekvencije vozila). Faktor povećanja je definirana kao omjer između izlazne i ulazne amplitude. U realnom slučaju ulazna amplituda predstavlja visinu neravnine na cesti, a izlazna vertikalni pomak tijela bolida. Ukoliko izlazna amplituda ima jednaku vrijednost kao i ulazna, što znači da se tijelo vozila kreće vertikalno za isti iznos kao i kotač. Iznos faktora povećanja za navedeni slučaj iznosi jedan, a odnosi se na trenutak u kojem vozilo prelazi relativno malom brzinom preko neravnine te u tom slučaju ne dolazi do komprimiranja opruge. Povećanjem brzine, frekvencija se povećava do trenutka u kojem vertikalno podizanje tijela bolida doseže maksimum, tijelo u tom trenutku vibrira rezonantnom frekvencijom. Pri rezonantnoj frekvenciji tijela bolida faktora povećanja postiže maksimalni iznos.



Slika 23. Dijagram ovisnosti omjera amplitude ovješen mase i pobude amplitude sustava (faktora povećanja) i omjera frekvencija ω/ω_0 [7]

Ostvarivanjem maksimalnog držanja vozila na stazi poželjna je najmanji mogući faktor povećanja, prilikom prevelikog skakanja vozila sile na opruzi mijenjanju iznos što ima utjecaj na karakteristiku držanja vozila.

Točka presijecanja nalazi se na $\sqrt{2}$ puta rezonantna frekvencija. Pri nižim frekvencijama, povećanjem prigušenja smanjuje se faktora povećanja, te je poželjno imati veći koeficijent prigušenja pri nižim frekvencijama. Sa desne strane točke presijecanja, niži koeficijent prigušenja daje manji iznos faktora povećanja, što znači da je pri višim frekvencijama poželjan manji iznos koeficijenta faktora povećanja. Generalno niže frekvencije odgovaraju nižim brzinama kretanja klipa amortizera, a više frekvencije većim brzinama kretanja klipa amortizera, stoga je poželjno imati veće iznose koeficijenta prigušenja pri nižim brzinama kretanja klipa amortizera.

Željeni Relativni Koeficijent prigušenja (C/C_{crit})					
Prednji Niže brzine	2	0.5	Prednji Veće brzine		
Stražnji Niže brzine	2	0.5	Stražnji Veće brzine		
Omjer Kompresija/Ekspanzija					
Prijelomna brzina mm/s	Područje nižih brzina		Područje viših brzina		
	Komp.	Ekspa.	Komp.	Ekspa.	
	12	1	2.25	1	2.25
	12	1	2.25	1	2.25

Slika 24. Preporučene vrijednosti relativnog koeficijenta prigušenja kao i omjera koeficijenta prigušenja kompresije i ekspanzije [7].

Uzimajući preporuke za FSAE vozilo izračun krivulja prigušenja je sljedeći:

Prigušenje za odabrani relativni koeficijent prigušenja pri niskim brzinama iznosi

$$C = \zeta \cdot C_k \quad (88)$$

dobiveno prigušenje odnosi se na kompresiju. Za određivanje prigušenja kod ekspanzije koristi se omjer kompresije/ekspanzije prikazan na slici 24.

$$C_R = \frac{C}{c/r} \quad (89)$$

c/r – omjer kompresije i ekspanzije

Na slici 26. prikazano je sučelje za izračun krivulja prigušenja. Za određivanje vrijednosti kritičnog prigušenja ovještene i neovještene mase potrebno je definirati parametre vozila prema slici 25. Parametri kao što su ukupna masa vozila, prednja i stražnja neovještana masa po kotaču te raspodjela težena na prednjoj i stražnjoj osovini dobiveni su mjerenjem na vozilu FSB Arctos. Prijenosni omjer poluge za ovaj proračun uzima se kao jedinica radi jednostavnosti jer su nam poznate konstante opruga svedenih na kotač. Sami iznosi konstanti prednjih i stražnjih opruga izvedeni su iz izraza (76) i(77).

Ukupna masa vozila [kg]		Raspodjela mase na prednjoj osovini [%]	
241		44	
Prednja neovještana masa po kotaču [kg]	Prijenosni omjer prednje poluge		Prijenosni omjer stražnje poluge
13	1		1
Stražnja neovještana masa po kotaču [kg]	Konstanta prednje opruge [N/mm]		Konstanta stražnje opruge [N/mm]
14	20		27.5

Slika 25. Ulazni podaci vozila FSB Arctos za izračun koeficijenata prigušenja.

Uvrštavanjem ulaznih podataka sa slike 25. dobivaju se vrijednosti kritičnog prigušenja za prednje i stražnje amortizere, ovještene i ne ovještene mase. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 26. u poljima sa žutim kvadratima. Sljedeći dio proračuna amortizera bazira se na svojstvu prigušnog sustava prikazanog na slici 23. i ovisnosti faktora povećanja amplitude β_t o omjeru frekvencija ω/ω_0 . Iznosi relativnog koeficijenta prigušenja kao i vrijednosti omjera koeficijenata prigušenja za kompresiju i ekspanziju amortizera odabrani su prema preporuci [2] kao i vlastitima zaključcima uslijed usporedbe rezultata.

Ovješena masa		Start		Neovješena masa	
Kritično prigušenje [Ns/mm]				Kritično prigušenje [Ns/mm]	
Prednji	1.71862			Prednji	3.18434
Stražnji	2.23102			Stražnji	3.36749
Željeni Relativni Koeficijent prigušenja (C/C_crit)					
Prednji Niže brzine	2	0.5	Prednji Veće brzine		
Stražnji Niže brzine	2	0.5	Stražnji Veće brzine		
Omjer Kompresija/Ekspanzija					
Prijelomna brzina mm/s	Područje nižih brzina		Područje viših brzina		
	Komp.	Ekspa.	Komp.	Ekspa.	
12	1	2.25	1	2.25	
12	1	2.25	1	2.25	

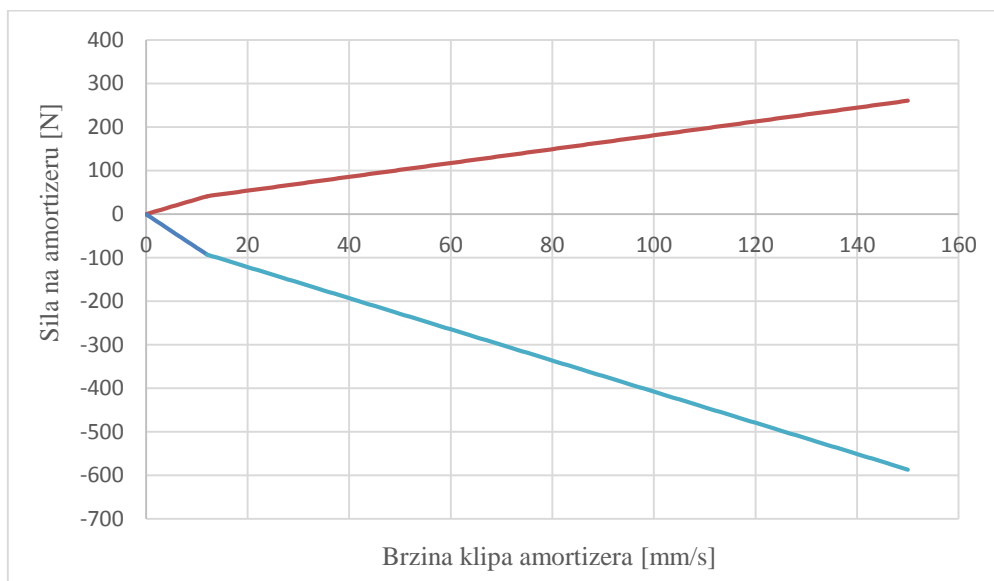
Slika 26. Sučelje programa gdje su prikazani iznosi koeficijenata kritičnog prigušenja (žute kućice) kao i vrijednosti relativnog koeficijenta prigušenja odabrani prema preporuci [2] (bijeli kvadrati).

Odabrani iznosi relativnog koeficijenta prigušenja prema preporuci [7] kao i omjeri koeficijenata prigušenja kompresije i ekspanzije daju nagibe pravaca prikazanih na slici 27.

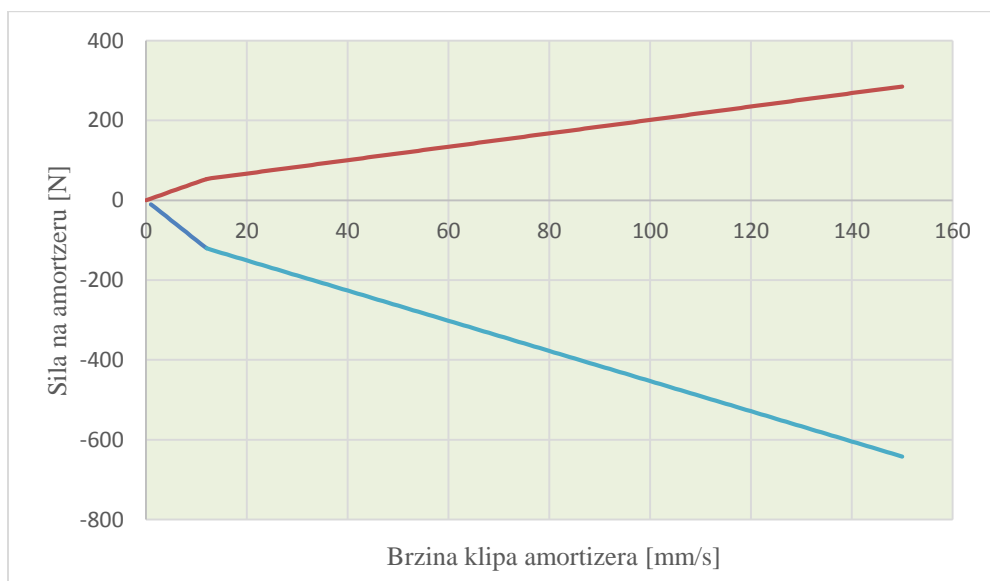
Koeficijent prigušenja kompresije pri nižim brzinama		Koeficijent prigušenja ekspanzije pri nižim brzinama	
	N-s/mm	N at 50 mm/sec	
Prednji	3.43723	171.862	
Stražnji	4.46203	223.102	
Koeficijent prigušenja kompresije pri višim brzinama		Koeficijent prigušenja ekspanzije pri višim brzinama	
	N-s/mm	N at 250 mm/sec	
Prednji	1.59217	398.042	
Stražnji	1.68375	420.936	

Slika 27. Koeficijenti prigušenja izračunati za bolid FSB Arctos

Uvrštavanjem koeficijenata prigušenja u dijagram ovisnosti brzine o sili na klip amortizera prikazana je na slikama 28. i 29. za prednje i stražnje kotače.



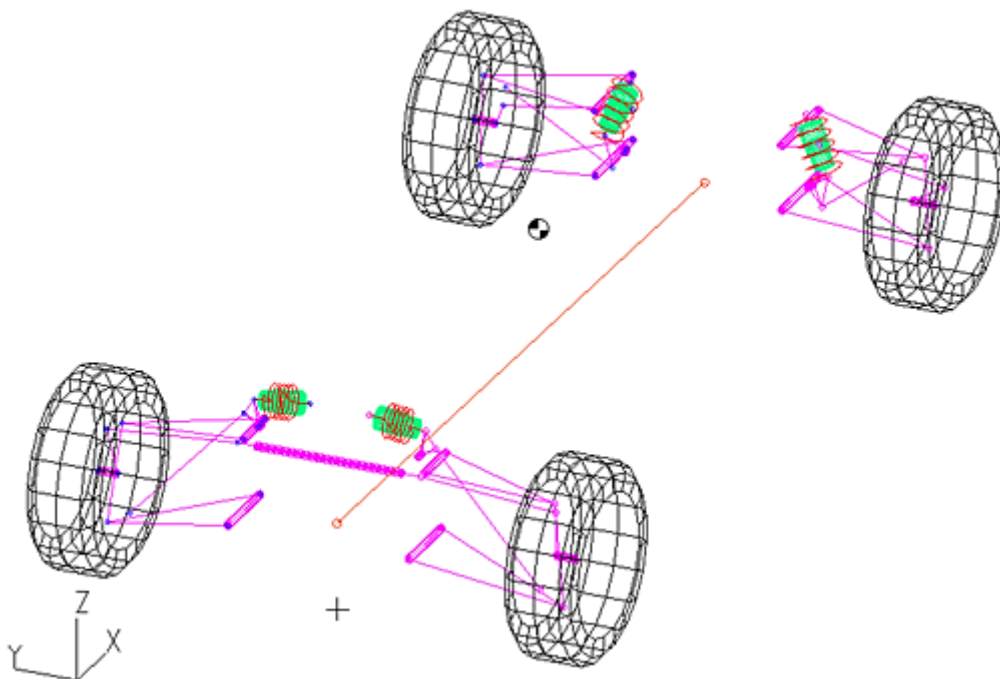
Slika 28. Karakteristika prepravljenog prednjeg amortizera pozicioniranog u ravni kotača za vozilo FSB Arctos



Slika 29. Karakteristika novog stražnjeg amortizera pozicioniranog u ravni kotača za vozilo FSB Arctos

8. Definiranje vozila FSB Arctos u programu Lotus

Za definiranje kinematike vozila korišten je programski paket Lotus suspension analysis. Karakteristične točke ovjesa kao i sami model prikazani su u tablicama 2. i 3.



Slika 30. Model vozila FSAE Arctos u programskom paketu za slismuliranje kinematike vozila „Lotus“.

Tablica 2. Vanjske dimenzije modela vozila

	FSB Arctos
Širina vozila	1450 mm
Visina vozila (od središta kotača do najviše točke vozila)	1150 mm
Udaljenost središta kotača od poda (prednji lijevi i desni kotač)	260 mm
Udaljenost središta kotača od poda (stražnji lijevi i desni kotač)	260 mm
Udaljenost od poda do podvozja vozila	125 mm
Međuosovinski razmak	1600 mm
Udaljenost od središta prednjeg kotača do stražnjeg dijela vozila	1700 mm
Položaj težišta vozila (x- udaljenost od središta prednjeg kotača, y- udaljenost od simetrale vozila, z- udaljenost od poda)	x=898 mm y=13 mm z=320 mm
Ovješena masa	187 kg

Moment tromosti valjanja (I_{xx})	17,5 kgm ²
Moment tromosti poniranja (I_{yy})	90,42 kgm ²
Moment tromosti rotiranja (I_{zz})	95,44 kgm ²

Tablica 3. Karakteristika ovjesa

		FSB Arctos
Međuosovinski razmak		1600 mm
Trag kotača	prednja osovina	1300 mm
	stražnja osovina	1250 mm
Visina težišta		316 mm
Hod kotača		±30 mm ±30 mm
Hod amortizera/opruge		±22 mm ±30 mm
Hod letve volana		±25 mm
Statički bočni nagib kotača	prednji kotači	0°
	stražnji kotači	0°
Statički uzdužni nagib osi zakretanja kotača	prednji kotači	8,6°
	stražnji kotači	-1,207°
Statički bočni nagib osi zakretanja kotača	prednji kotači	6,714°
	stražnji kotači	6,714°

Definiranje vozila u programu CarSIM sastoji se od kinematike, karakteristike amortizera i opruge te karakteristike gume.

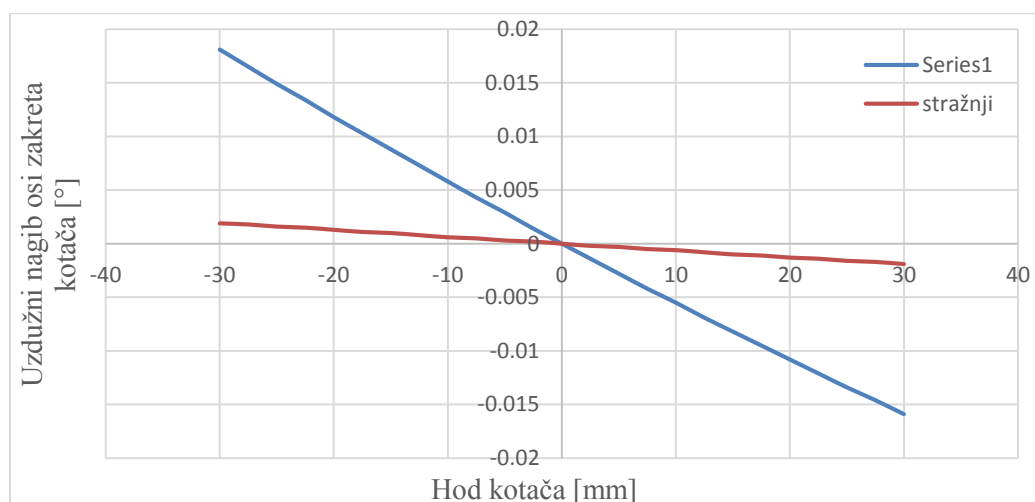
8.1. Kinematika ovjesa

Vrijednosti neovještene mase kao i iznose bočnog nagiba (engl. *camber*), kut zakreta kotača, bočni i uzdužni nagib osovinnice, geometrijsko predvođenje, konvergencije/divergencije kotača (engl. *Toe-in/out*) potrebno je definirati u sučelju kinematike.

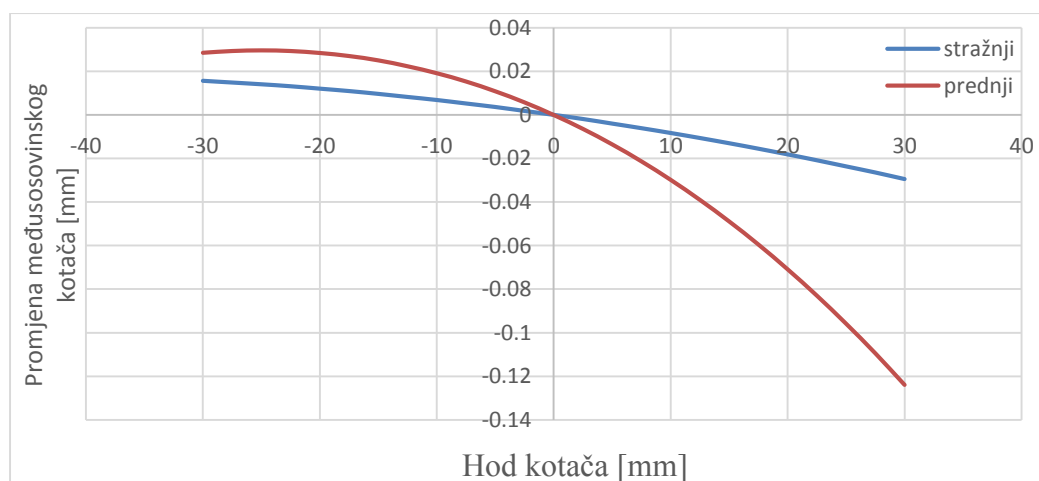
Tablica 4. Karakteristika mase, inercije i statičkog poravnanja

	Prednji	Stražnji
Ne ovješena masa	26 kg	28 kg
Moment inercije kotač	0,11 kg·m ²	0,11 kg·m ²
Bočni nagib kotača (engl. <i>Camber</i>)	Left 0°	0°
	Right 0°	0°
Konvergencija kotača (engl. <i>Toe-in</i>)	Left 0.1°	-0.1°
	Right 0.1°	-0.1°

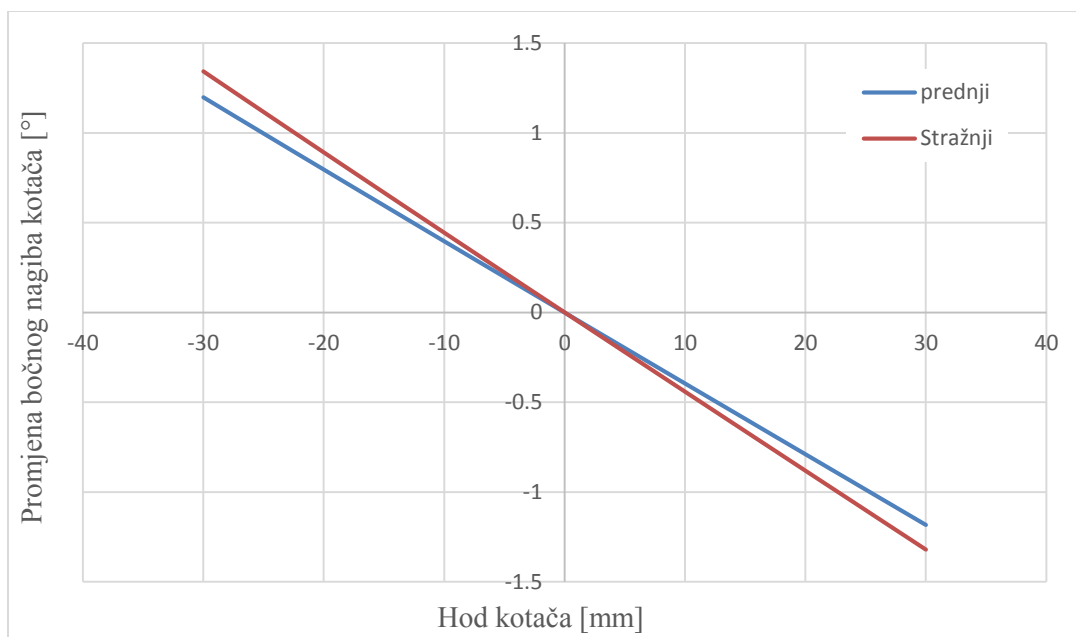
Karakteristika kinematike ovjesa prikazana su na sljedećim slikama.



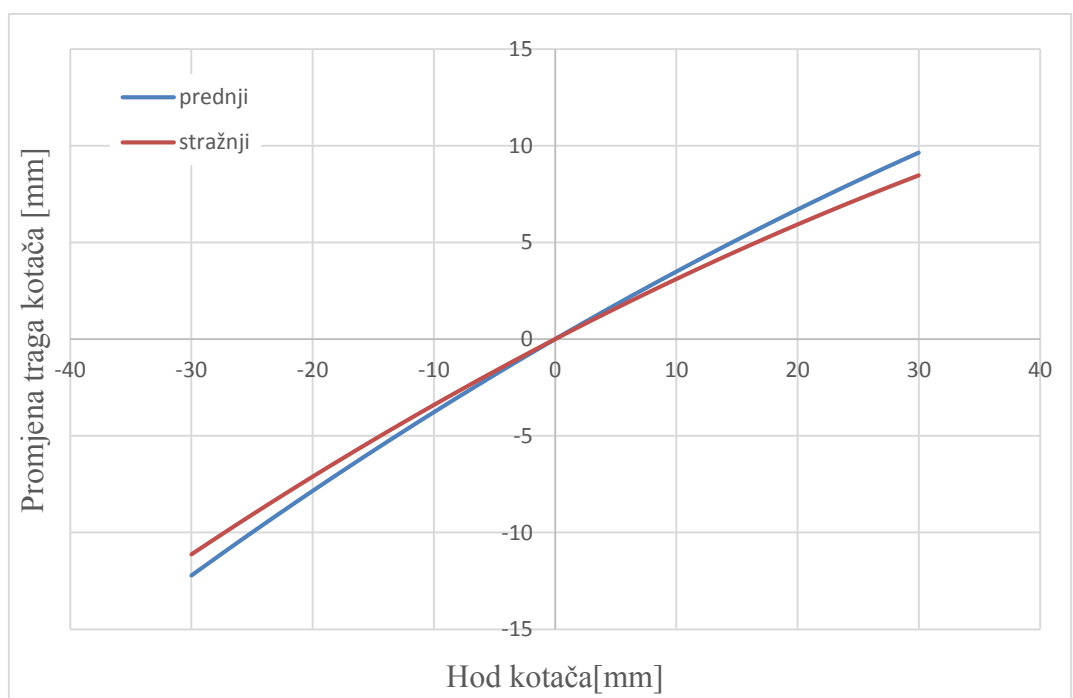
Slika 31. Promjena nagiba uzdužne osi kotača za prednju i stražnju osovinu



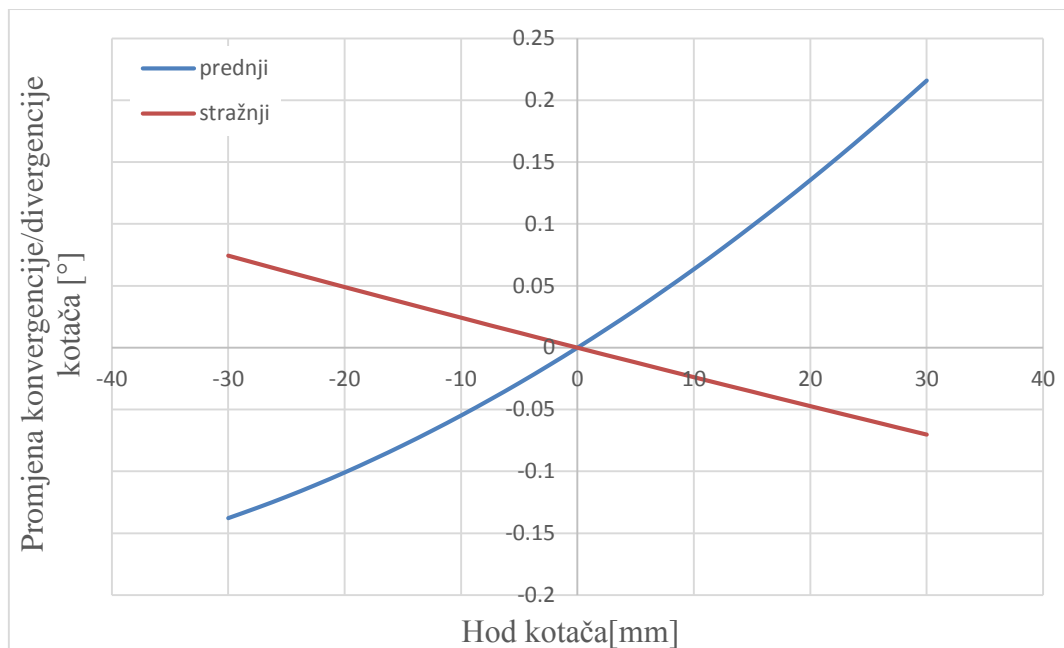
Slika 32. Promjena međusosovinskog razmaka



Slika 33. Promjena bočnog nagiba uslijed hoda kotača



Slika 34. Promjena nagiba uslijed hod kotača



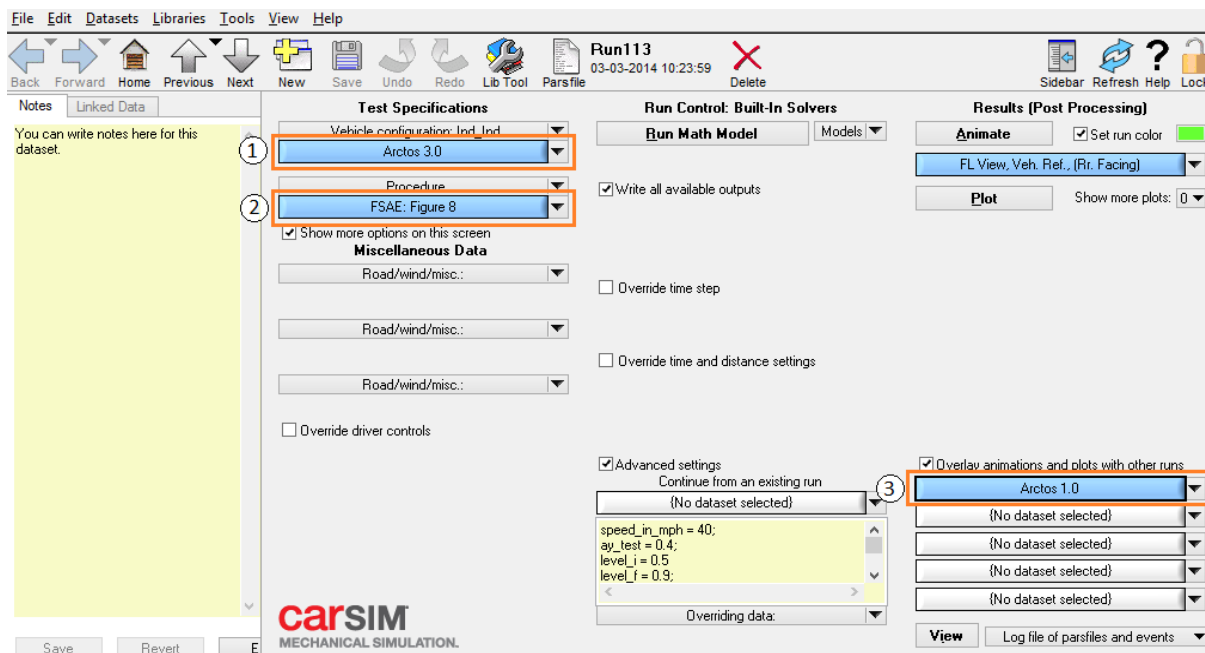
Slika 35. Promjena konvergencije/divergencije uslijed hoda kotača

Definirane karakteristike kinematike vozila korištene su za model postojećeg vozila FSB Arctos te kao takve nisu mijenjate. Parametri koji su se uspoređivali odnose se na karakteristiku amortizera i opruge.

Vrijednosti kinematskih značajki za prepravljeno vozilo FSB Arctos 3.0 korištene su iz diplomskog rada Ivana Perkovića [8].

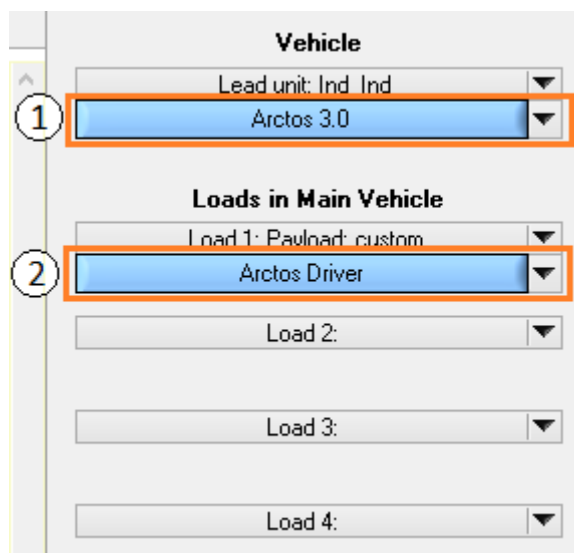
9. Definiranje vozila u programu CarSim

Glavno sučelje programa CarSim prikazano je na slici 36. Osnovne značajke glavnog sučelja su označeni prema brojevima na slici 36. i označavaju tri osnovne funkcije CarSim-a, a to su definiranje modela vozila (①), odabir ispitne procedure (②) i usporedba dvaju ili više modela na istom dijagramu (③).

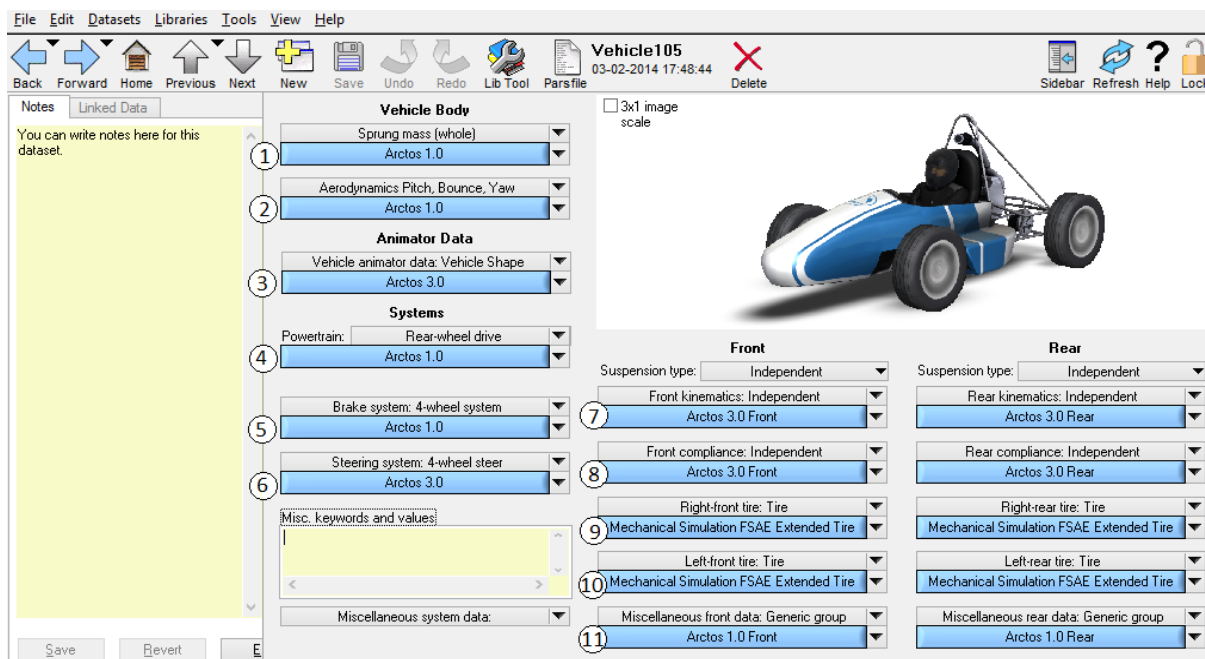


Slika 36. Glavno sučelje programa CarSim

Za relevantno simuliranje vožnje formule potrebno je uvrstiti karakteristiku vozača. Za definiranje vozača potrebno je odabrati iz padajućeg izbornika *Vehicle configuration - Loaded condition*. Na slici 37. definiranje vozila vrši odabirom na prozor (①) dok je zadavanje dodatnih opterećenja kao što je masa vozača potrebno zadati preko prozora (②). Moguće je također definirati dodatna opterećenja vozila kao što je položaj rezervoara goriva kao i njegova masa, što u ovo slučaju neće biti definirano jer je masa rezervoara sa gorivom uzeta u obzir prilikom mjerenja težišta.



Slika 37. Pod sučelje modela za definiranje dodatnih opterećenja



Slika 38. Glavno sučelje za definiranje vozila

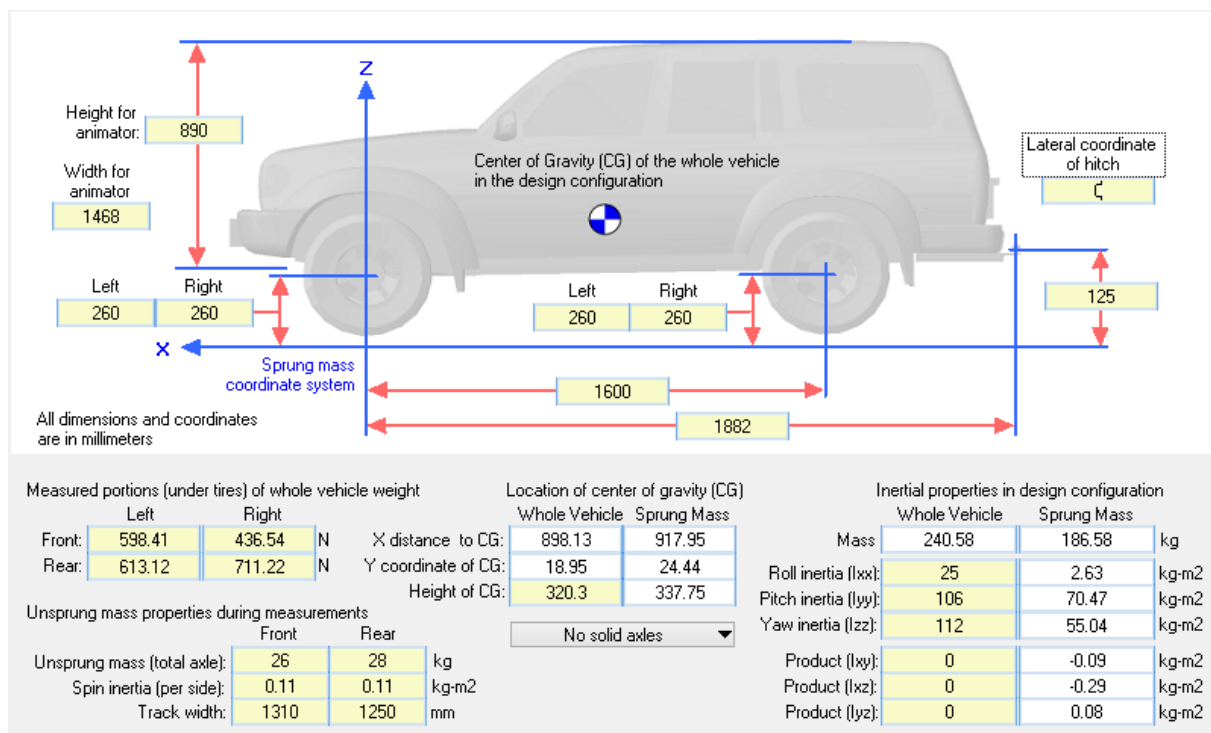
9.1. Kompletно vozilo (engl. Vehicle body)

Ulaskom u prozor naziva Arcos 3.0 sa slike 38. (broj polja ①) otvara se sučelje za definiranje vozila prikazano na slici Slika 38. Sučelje za definiranje vozila podijeljeno je u područja za definiranje mase vozila i položaja težišta (engl. Vehicle Body ① i ②), definiranje izgleda modela u animaciji (engl. Animator Data ③) i kompletan sustav kotača koji se sastoji od pogona (engl. Powertrain ④), sustava kočenja (engl. Brake system ⑤), sustav upravljanja (engl. Steering system ⑥) te kompletna kinematika prednjeg i stražnjeg ovjesa kao i svojstva korištenih guma (⑦, ⑧, ⑨, ⑩). Polje pod rednim brojem jedan (①) u kojem se određuje masa vozila potrebno je namjestiti u programu CarSim tako da računa ukupnu masu što je uključuje

padajućim izbornikom engl. *Sprung mass (whole)*. Postupak određivanja ukupne mase kao i opterećenja prednje i stražnje osovine, a time i položaja centra gravitacije napravljen je mjerenjem na vagama, postupak je prikazana na slici 39.



Slika 39. Vaganje bolida FSB Arctos u svrhu određivanja položaja težišta

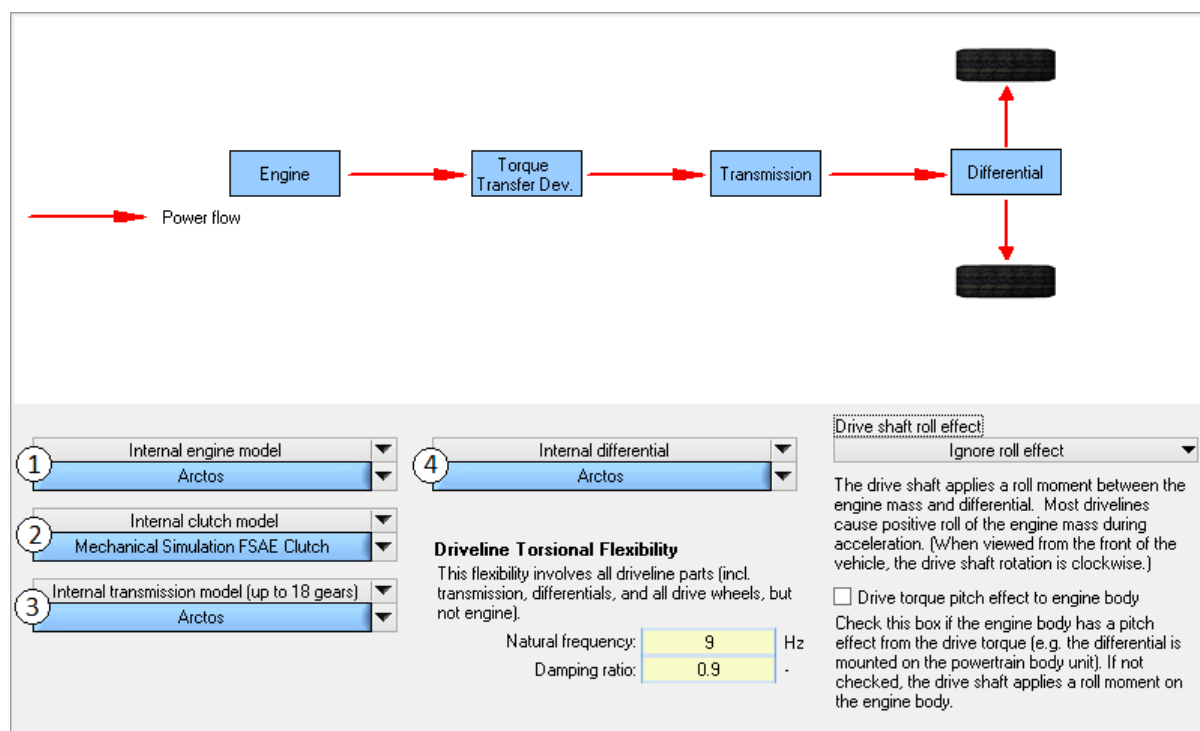


Slika 40. Prikaz sučelja za definiranje mase i centra gravitacije vozila kao i pripadajućih momenata inercije oko odgovarajućih osi

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti vaganjem (ovješanih i neovješanih masa) i mjerenjem vozila moguće je u potpunosti definirati vozilo kako je prikazano na slici Slika 40.

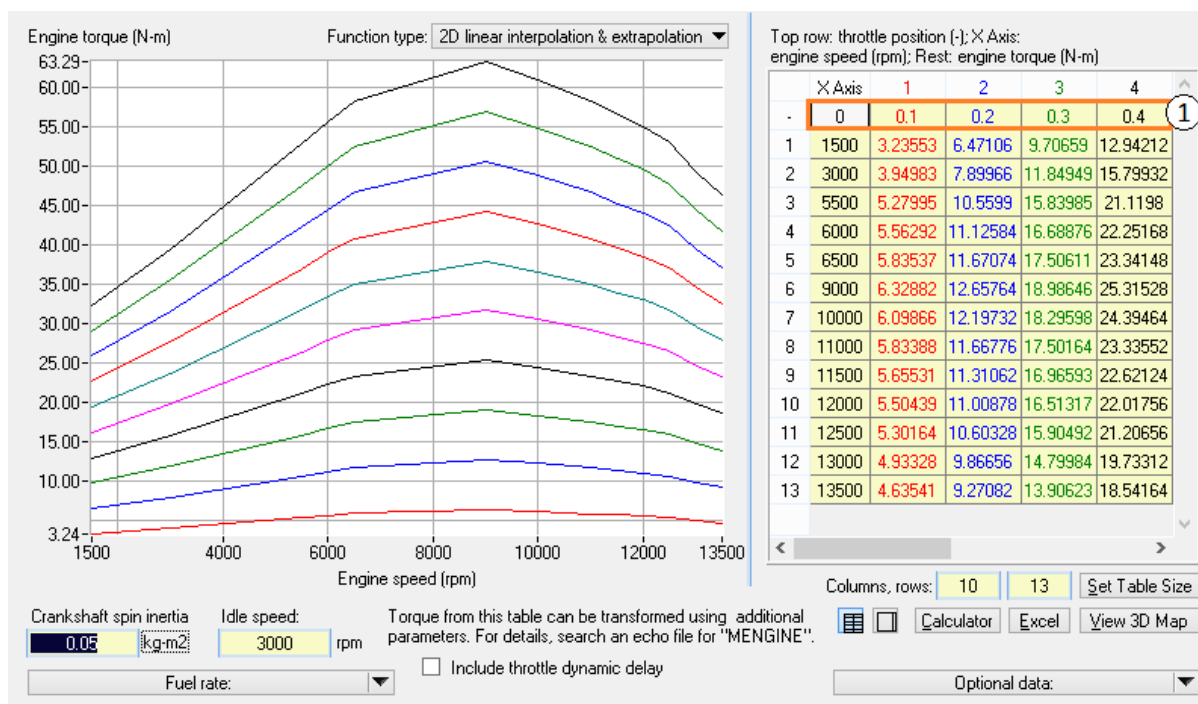
9.2. Pogon i prijenos snage (engl. Powertrain)

Definiranje karakteristike motora, spojke, mjenjačke kutije te diferencijala vrši se otvaranjem sučelja broj šest (©) sa slike 38. koji je prikazan na slici 41.



Slika 41. Definiranje pogona i prijenosa snage

Osim vanjskih dimenzija vozila i specifikacija ovjesa moguće je definirati i pogonski sustav bolida. Pri definiranju pogonskog sustava podaci koji su potrebni su sljedeći: mapa motora i prijenosni omjeri u mjenjaču. Na slici 42. je moguće vidjeti usporedbu efektivnog momenta i snage motora, te su na slici 43. prikazani prijenosni omjeri.



Slika 42. Mapa motora

Definiranje karakteristike momenta motora prikazano je na slici 42. definiran tablicom (prilog 1) u kojem je prvi stupac apscisa, brzina vrtnje motora, a svaki sljedeći definira krivulju momenta za otvorenost zaklopke u postocima koja se definira u prvom redu svakog stupca ①. Prijenosni omjer mjenjačke kutije definira se otvaranjem sučelja broj tri (③) sa slike 41. za svaku brzinu prikazan je na slici 43.

Up to 18 gears

Internal shift schedule

6 Forward gears

	Gear Ratio	Inertia	Efficiencies	
			Driving	Coasting
R:		0.01	1	1
N:		0.015		
1:	2.75	0.015	0.95	0.99
2:	2	0.015	0.95	0.99
3:	1.667	0.015	0.95	0.99
4:	1.444	0.015	0.95	0.99
5:	1.304	0.015	0.95	0.99
6:	1.208	0.015	0.95	0.99

Shift duration: 0.075 sec

Shift Schedules

1-2: Shift 1st to 2nd

2-3: Shift 2nd to 3rd

3-4: Shift 3rd to 4th

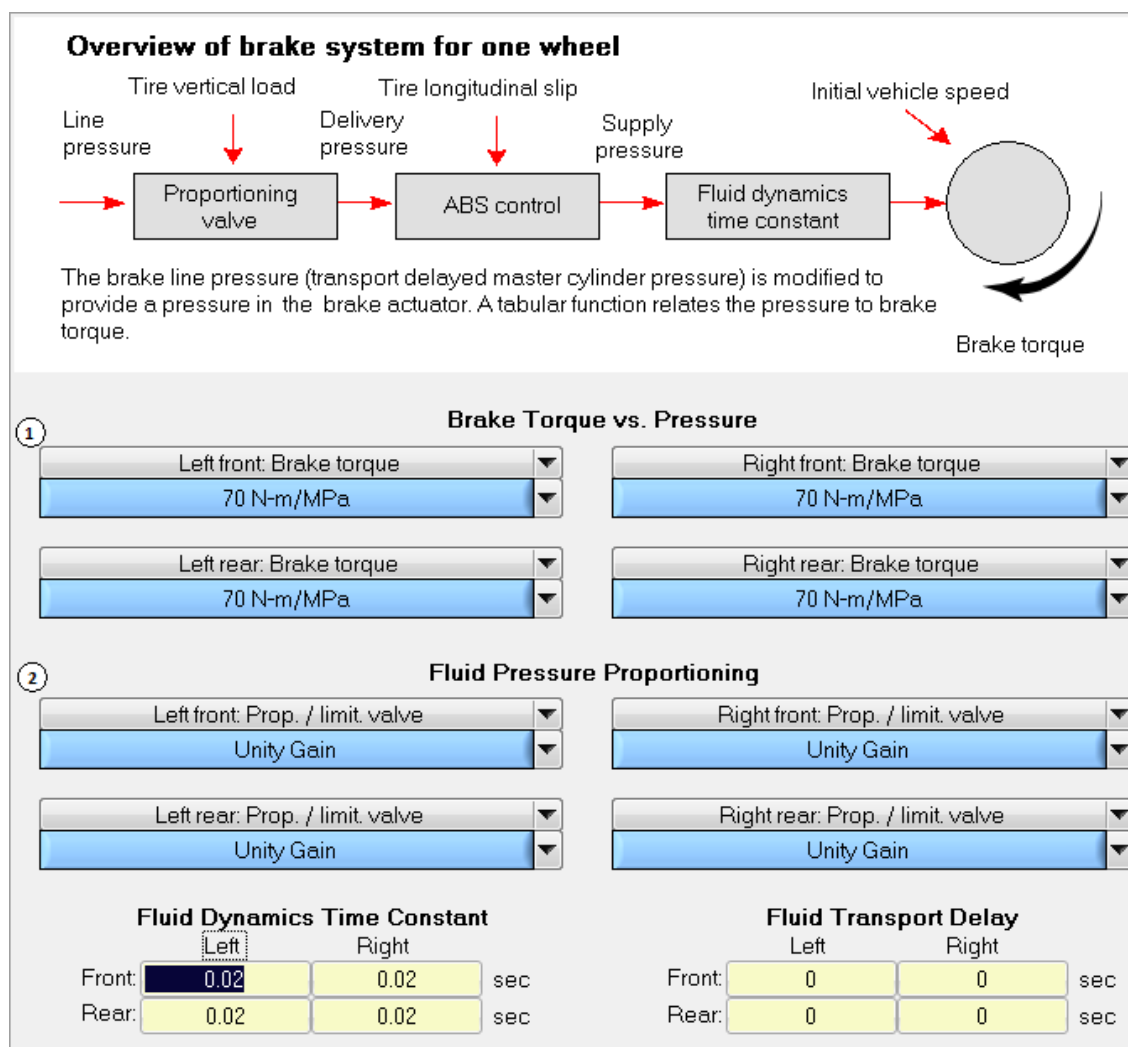
4-5: Shift 4th to 5th

5-6: Shift 5th to 6th

Slika 43. Izbornik za definiranje prijenosne kutije

9.2.1. Kočnice(engl. *Brake system (4 wheel system)*)

Izbornik za kočnice se nalazi pod brojem ⑤ na slici 38. U tom izborniku se unosi određuje karakteristika kočenja. Kočenje se definira iznosom koji je omjer kočnog momenta i tlaka u kočnom sustavu te je proračunat u skladu sa veličinom kotača i pretpostavljenom težinom kojom će biti opterećen bolid.



Slika 44. Izbornik kočionog sustava

Pod točkom jedan(①) se određuje iznos kočione sile, odnosno omjer kočionog momenta i tlaka u kočnom sustavu na svaki kotač posebno.

9.2.2. Gume

Odabirom izbornika pod točkama osam i devet (⑧, ⑨) na slici 38. otvara se izbornik u kojem se definiraju karakteristike pneumatika. Kao što se vidi na slici 45., karakteristike su označene brojkama od jedan do osam (①; ⑧). Karakteristika pod točkom jedan (①) prikazuje promjenu polumjera pneumatika uslijed opterećenja, Slika 46. Od proizvođača je dobivena karakteristika za različite tlakove u gumama, te karakteristika prema kojoj se promjena polumjera pneumatika mijenja i uslijed različitih statičkih bočnih nagiba kotača (engl. *camber*).

1 Vertical Force ☒ Use tire force table

Vertical force: Tire: Fz vs Deflection
Avon 1.172bar

Animator Settings

Tire width: 158 mm
The unloaded radius is also used to scale the animated wheel.

☒ Use custom animator shape

Animator: Shape Group
FSAE Tire Shape

Animator: Sound Set
Tire Sounds - 400 kg Rated Load

Tire Model Option
Internal Table Model with Camber Details

Rolling Resistance Moment

Rr_c: 0.004
Rr_v: 0.000025 h/km
☒ Include rolling resistance due to Fx

2 Shear Forces and Moments

Longitudinal force: Tire: Fx
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Fx

Lateral force: Tire: Fy
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Fy

Aligning moment: Tire: Mz
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Mz

Overturning moment: Tire: Mx
Zero

☐ Include combined slip transition

6 Lateral force vs gamma: Tire: Fy
Example extended

7 Aligning moment vs gamma: Tire: Mz
Zero

8 Overturning moment vs gamma: Tire: Mx
Zero

Dynamic Properties

Tire and wheel spin moment of inertia (added to the spin inertia of the unsprung mass):
0 kg-m²

Tire Lag

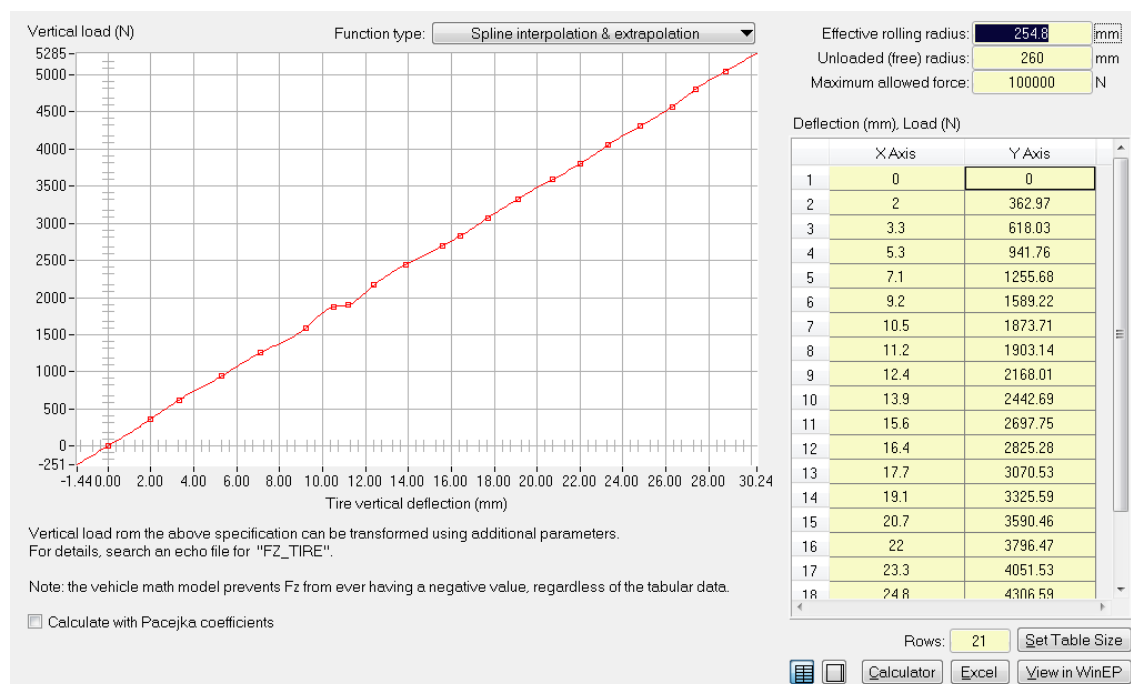
Tire force or moment

Distance rolled

L for Fx: 32 mm
L for Fy and Mz: 575 mm

The models use modified equations to simulate tire lag for Fy and Mz at speeds below this threshold.
Cut-off speed: 5 km/h

Slika 45. Izbornik za definiranje pneumatika



Slika 46. Izbornik za definiranje promjene polumjera kotača uslijed opterećenja

Ostale karakteristike sa slike 45., od točke dva (②) do osam (⑧) su u korelaciji sa više faktora; opisuju djelovanje horizontalnih sila, bočnih sila u zavisnosti o promjeni bočnog nagiba kotača (engl. *camber*), kuta klizanja (engl. *slip angle*) i omjera kuta klizanja i faktora trenja (engl. *slip ratio*). Djelovanjem tih sila, javljaju se i momenti koji djeluju na pneumatike koji su isto tako u zavisni o promjeni spomenutih faktora ako i sile.

9.3. Upravljanje

Steering Column Properties

Column inertia: 0.05 kg-m2
System inertia: 0.000101 kg-m2
Column damping: 0 Nm-s/deg
Column hysteresis: 0 Nm
Hysteresis ref. angle: 0 deg
Calculate torque from kingpin moments

Front Steering System Type
Front: manual rack and pinion

Rear Steering System Type
Rear: no rear steering

Steering Gear Kinematics
Constant rack & pinion ratio
C factor: 100 mm/rev

Road-Wheel Steer vs. Steering Gear
Rack to front wheels: Steer kinematics
Arctos 3.0
Define steer angles in vehicle coordinates

Kingpin Geometry

	Left-Front	Right-Front	
Lateral offset @ center:	-40.77	-40.77	mm
Kingpin inclination:	8.46	8.46	deg
X coord. of KP @ center:	27.46	27.461	mm
Caster angle:	8.6	8.6	deg

	Left-Rear	Right-Rear	
Lateral offset @ center:	-35.73	-35.73	mm
Kingpin inclination:	6.2	6.2	deg
X coord. of KP @ center:	-0.63	-0.63	mm
Caster angle:	-1.207	-1.207	deg

Compliance
Front compliance: Steering compliance
No Steer Compliance
Rear compliance: Steering compliance
No Steer Compliance

Front steering damping: 30 N-s/mm

Speed-Sensitive Ground-Friction Steer Torque
Front wheels: Parking Torque
Zero

Front View **Side View**

Kingpin inclination angle
Kingpin lateral offset
Caster angle
Steering axis

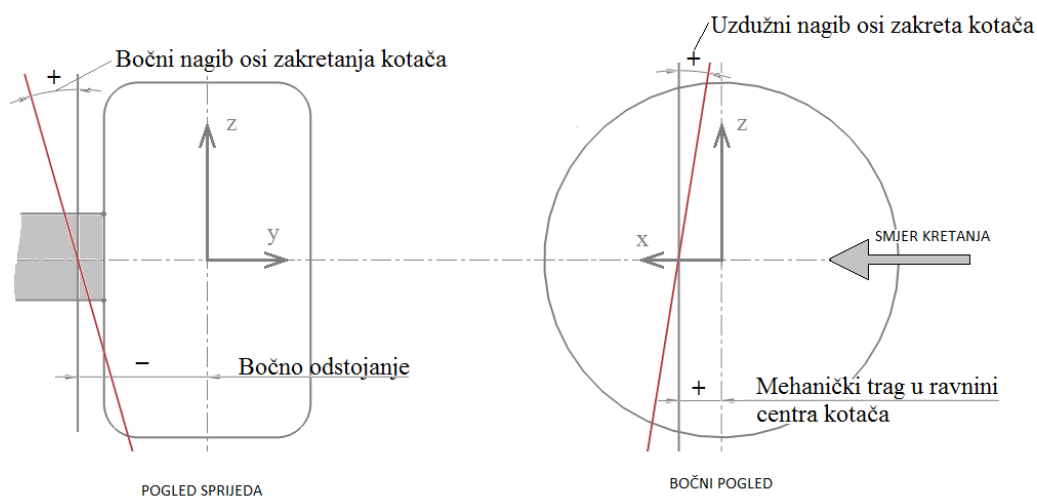
Slika 47. Izbornik za definiranje statičkih karakteristika geometrije kotača

Definiranje upravljanja vrši se otvaranjem sučelja broj šest (⑥) sa slike 38. Tablica statičkih karakteristika ovjesa prikazana je u tablici 5.

Tablica 5. Statičke karakteristike geometrije kotača

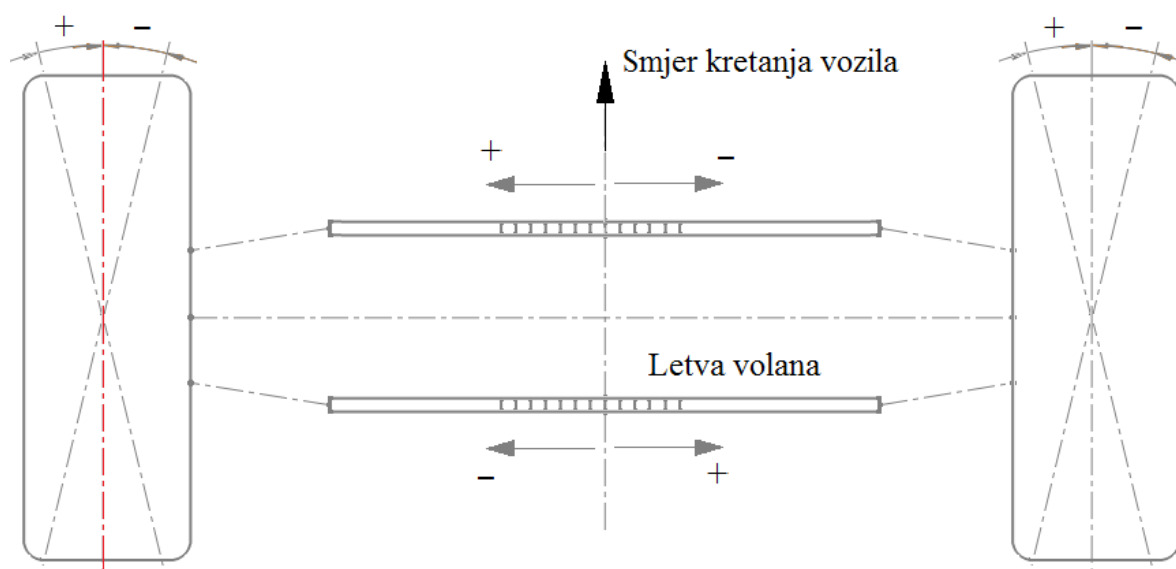
	Lijevo-prednji	Desno-prednji	
Bočna udaljenost osi zakreta kotača od centra kotača	-44,77	-44,77	mm
Bočni nagib osi zakreta kotača	8,46	8,46	deg
Mehanički trag u ravnini centra kotača	27,46	27,46	mm
Uzdužni nagib osi zakreta kotača	8,6	8,6	deg
	Lijevo-stražnji	Desno-stražnji	
Bočna udaljenost osi zakreta kotača od centra kotača	-35,73	-35,73	mm
Bočni nagib osi zakreta kotača	6,2	6,2	deg
Mehanički trag u ravnini centra kotača	-0,63	-0,63	mm
Uzdužni nagib osi zakreta kotača	-1,207	-1,207	deg

Prikazane vrijednosti potrebno je uvrsti sa odgovarajućim predznakom koji odgovara konvenciji sa slike 48.



Slika 48. Prikaz definiranja statičkih karakteristika kotača kao i pravilni predznaci u programu CarSim

Za potpuno definiranje upravljanja kotača potrebno je definirati zakret kotača u ovisnosti o pomaku letve volana. Definiranje navedene karakteristike vrši se otvaranjem sučelja pod brojem jedan(①) prikazanog na slici 47. Pravilno definiranje predznaka zakreta kotača kao i smjera pomaka letve volana prikazano je na slici Slika 49. Zakretanje kotača definira se u odnosu na koordinatni sustav vozila te se definira postavljanjem sučelja pod rednim brojem dva (②) sa slike Slika 47. postavljanjem na engl. *Define steer angles in vehicle coordinates*.



Slika 49. Definiranje predznaka prilikom zakretanja kotača u ovisnosti o pomaku letve volana

Ovisnost stupnja zakreta kotača o pomaku letve volana prikazana je na slici 49. te je potrebno voditi računa o položaju letve volan, ispred ili iza osi zakretanja kotača, prikazana je u tablici u prilogu ovog rada.

9.4. Kinematika kotača

Kinematika kotača definira promjenu kutova kotača u ovisnosti o hodu kotača. Potrebno je odabrati vrstu ovjesa koju definiramo u ovom slučaju to je neovisni ovjes (engl. *Independent*). Otvaranjem sučelja a slike 38. pod rednim brojem sedam (⑦) otvara se prozor prikazan na slici 50.

Mass and Inertia

Unsprung mass (both sides): 26 kg
 Fraction steered (0-1): 0.9

Spin inertia for each side:
 Left: 0.11 kg-m²
 Right: 0.11 kg-m²

Wheel centers
 Dimensions are in millimeters

1310

Sprung mass origin

☐ Set wheel center height here

Lateral coordinate of suspension center: 0 mm

Note:
 No roll center location is specified because the location and movement of the axle are defined by the kinematic data.

Static Alignment Settings

	Left	Right	deg
Camber:	0	0	
Toe:	0	0	

Kinematics Based on Jounce

⑥ Define jounce from spring data

Wheel Dive Movement Due to Jounce

① Left wheel dive (caster change): Dive table
 Arctos 3.0 Front

② Left wheel X: Longitudinal Movement
 Arctos 3.0 Front

Right wheel dive (caster change): Dive table
 Arctos 3.0 Front

Right wheel X: Longitudinal Movement
 Arctos 3.0 Front

Wheel Roll Movement Due to Jounce

③ Left wheel camber: Camber
 Arctos 3.0 Front

④ Left wheel lateral (-Y): Lateral Movement
 Arctos 3.0 Front Right

Right wheel camber: Camber
 Arctos 3.0 Front

Right wheel lateral (+Y): Lateral Movement
 Arctos 3.0 Front Right

Toe (Steer) Due to Jounce

⑤ Left wheel toe: Toe
 Arctos 3.0 Front

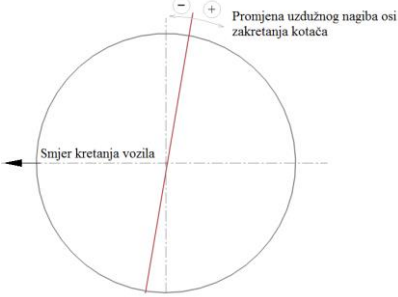
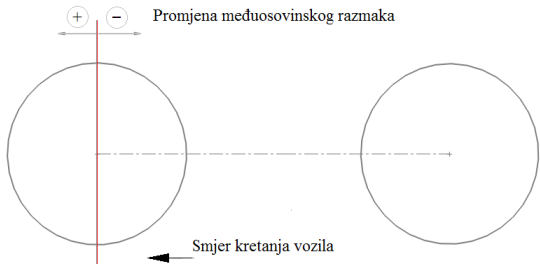
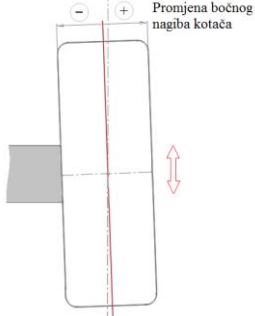

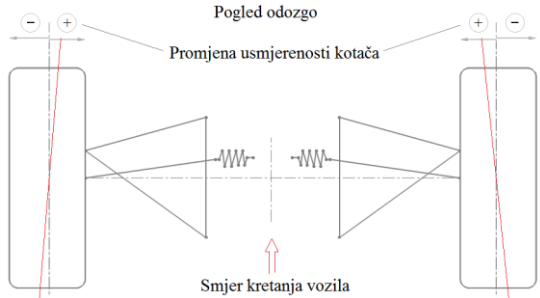
Right wheel toe: Toe
 Arctos 3.0 Front

Front End View + Camber

Top View + Toe

Slika 50. Izbornik za definiranje kinematike kotača

Iznosi tabličnog zapisa promjene pojedine komponente ovjesa definirani su prilogu ovog rada. Unos podataka u tablici mora ići od manjeg prema većem broju (ukoliko broj ima negativan predznak unosi se prvi). Definiranje pojedinih promjena potrebno je izvesti poštivanjem predznaka prema kojem se ta promjena odvija. Ukoliko odgovarajuća promjena ima određenu vrijednost u nultom položaju potrebno je promjenu prilagoditi tako da je vrijednost te iste jednaka nuli. Primjeri predznaka dani su prikazom na slici 51.

 <p>Promjena uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača- vertikalnim hodom prema gore se smanjuje dok hodom prema dolje se povećava</p>
 <p>Promjena međuosovinskog razmaka</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena međuosovinskog razmaka- vertikalnim hodom prema gore se povećava dok hodom prema dolje se smanjuje</p>
 <p>Promjena bočnog nagiba kotača</p>	<p>-promjena bočnog nagiba kotača- vertikalnim hodom prema gore postaje negativan, dok hodom prema dolje postaje pozitivan</p>
 <p>Bočni pomak kotača</p>	<p>-promjena bočnog pomaka kotača- vertikalnim hodom prema gore se povećava, dok hodom prema dolje smanjuje</p>
 <p>Pogled odozgo</p> <p>Promjena usmjerenosti kotača</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena usmjerenosti kotača- vertikalnim hodom prema gore se povećava, dok hodom prema dolje smanjuje</p>

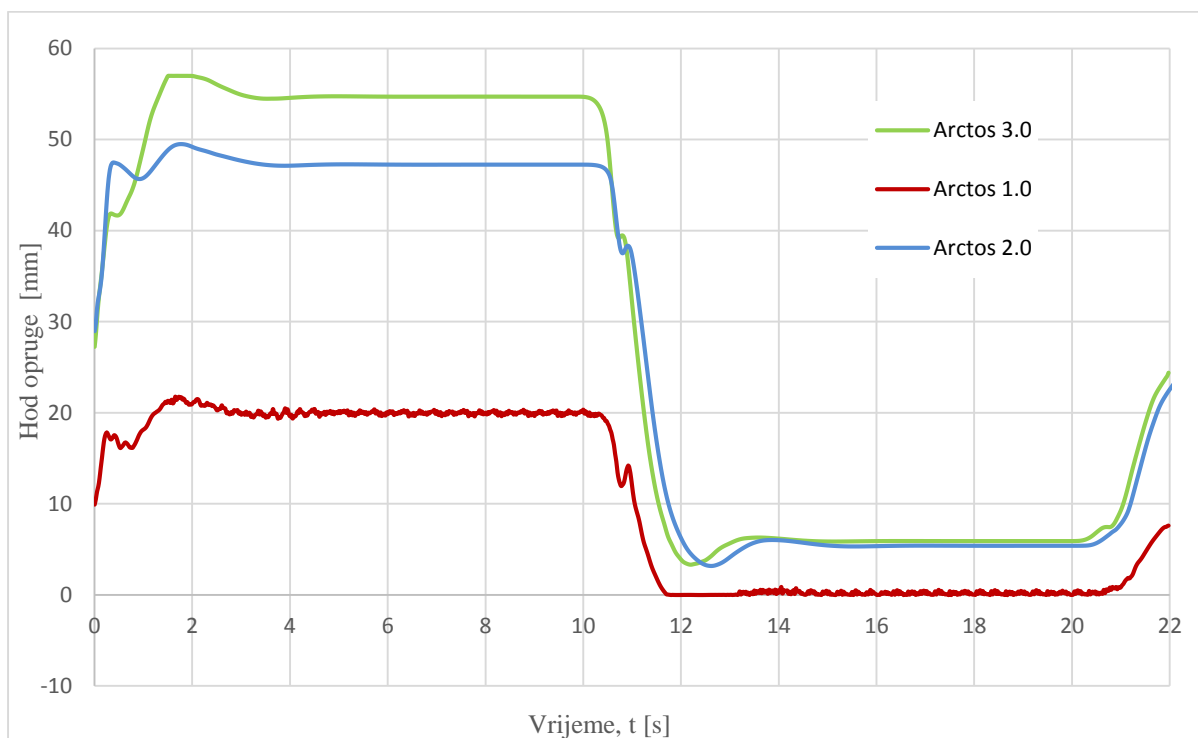
Slika 51. Prikaz potrebnih karkterstika ovjesa te odgovarajućih predznaka

10. Usporedba rezultata simulacije

U ovome poglavlju će se prikazati izrađeni modeli prema navedenom načinu u prijašnjim poglavljima koristeći spomenute aplikacije. Koriste se tri modela pod imenima Arctos 1.0 Arctos 2.0 i Arctos 3.0. Model Arctos 1.0 predstavlja model koji je stvarno napravljen i koji je prema navedenom zadatku bilo potrebno što točnije opisati i analizirati, model Arctos 2.0 predstavlja vozilo sa istom geometrijom ovjesa ali sa prepravljenim amortizerom i oprugama, dok model Arctos 3.0 predstavlja model koji se napravljen prema prijedlozima iz navedene literature [1], [2], te koristi izmijenjenu geometriju kao i oprugu sa amortizerom.

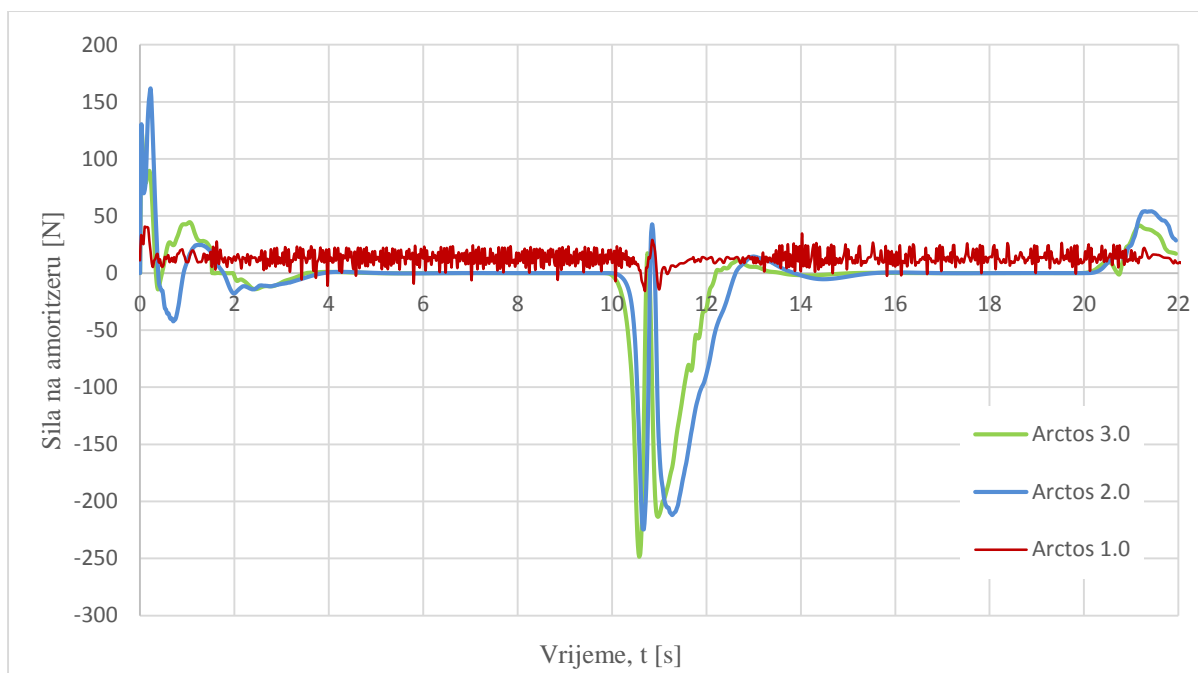
Testiranje vozila vrši se na tri ispitne staze. Utvrđivanjem ispitnih staza moguće je ispitati i usporediti postojeće vozilo FSAE tima FSB Arctos te napravljene preinake u svrhu poboljšanja voznih karakteristika. Same karakteristike vozila biti će pojašnjene na sljedećim dijagramima od. Karakteristike stvarnog vozila kao i određene karakteristike za prepravljeno vozilo objašnjene su u ovom radu prethodnim poglavljima. Iako je cilj zadatka bio proučiti dinamične karakteristike samog vozila također je izvršena detalja analiza pravilnog postupka izrade sportskog ovjesa. Dobiveni rezultati koji će se prikazati u sljedećim dijagramima daju osnove smjernice razvoja bolida za natjecanje formula student FSAE. Iako je vršena samo preinaka samog ovjesa, korištenjem istog pogona kao i mjenjačke kutije, postignuti su značajni pomaci što se tiče brzine vozila.

10.1. Ispitna staza osmica



Slika 52. Hod opruge

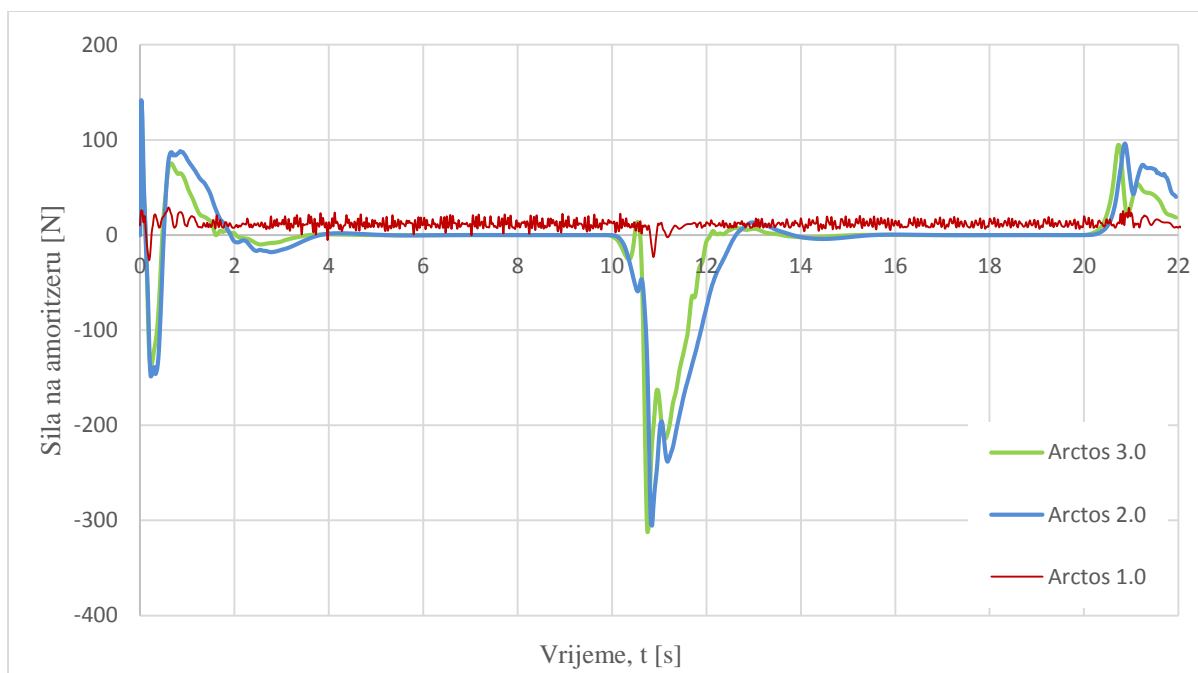
Dijagram na slici 52. prikazuje hod opruge prilikom vožnje vozila po testnoj stazi osmice za tri različita bolida. Iako je na dijagramu radi jednostavnosti predodžbe prikazan samo hod prednje lijeve opruge vidljiva je osnovna razlika dvaju bolida. Prikazani hod opruge odnosi se u isto vrijeme i na podizanje samoga kotača iz razloga što se definirana karakteristika opruge promatra u ravnini osi kotača bez djelovanja prijenosne klackalice i potisne šipke (engl. *pushrod*). Ukupni hod kotača mogući iznosi ± 30 mm što je iznad minimalne vrijednosti od jednog inča (25,4 mm) propisanog FSAE pravilnikom. Kako je vidljivo sa slike 52. modeli Arctos 2.0 i Arctos 3.0 iskorištavaju veći dio mogućeg hoda kotača. Potrebno je uočiti da je opruga u stanju mirovanja vozila komprimirana 28 mm što se postiglo ugradnjom opruge čija je konstanta opruge manje krutosti od trenutno ugrađene opruge u vozilo FSB Arctos 1.0. Iskorištavanjem konstrukcijski dozvoljenog hoda ugradnjom opruge niže opružne karakteristike („mekše opruge“) ostvareno je smanjenje nepoželjnih vibracija kotača.



Slika 53. Djelovanje sile na prednje amortizere prepravljenog i postojećeg modela

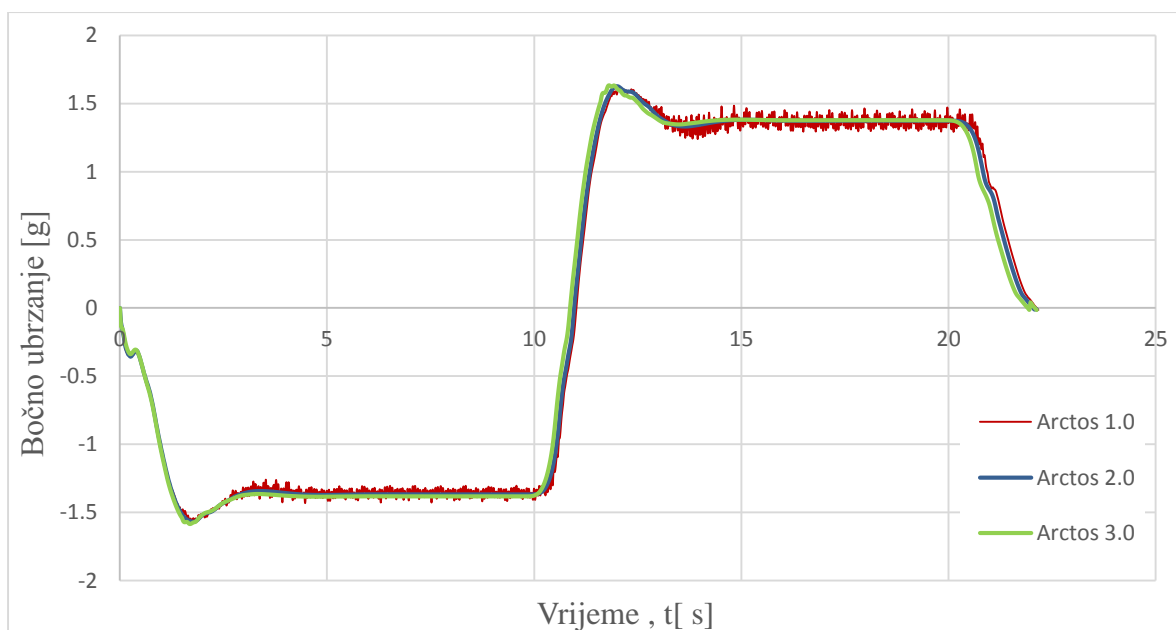
Dijagram sile ostvarene na amortizeru prilikom izvršenja testne staze osmice vidi se na slici 53. Prilikom ulaska u prvi desni zavoj radijusa devet metara opterećenje se prebacuje na lijeve kotače te kako je prikazano na slici 53. vidi se sila koja djeluje na amortizer. Kako je moguće vidjeti utjecaj sile na prepravljenom bolidu je veći u trenutku ulaska u zavoj za prednji lijevi (vanjski) kotač, ali amortizer potom upije djelovanje te sile već nakon četiri sekunde zavoja. Daljnjim promatranjem dijagrama uočava se potpuna neaktivnost amortizera sve do promjene smjera testne staze iz desnog zavoja u lijevi. Vrijednost sile koju amortizer upija negativnog je predznaka u ovom trenutku što sugerira da se amortizer izdužuje određenom brzinom. Vrijednosti prikazane odnose se za prednji lijevi kotač zbog jednostavnosti prikaza, međutim djelovanje prednjeg desnog amortizera daje silu pozitivnog predznaka zbog djelovanja amortizera u kompresiji. Testna staza osmice izvršena je također i za postojeće karakteristike vozila FSB Arctos te je prikaza na dijagramu kao isprekidana linija. Promatranjem djelovanja sile na amortizer može se uočiti konstantno opterećenje amortizera, sila prilikom ulaska u zavoj kojom djeluje amortizer znatno je manja od prepravljenog model. Također je važno za uočiti nagli porast vibracije oko druge sekunde testa te djelovanje amortizera tokom cijele vožnje po krugu. Sila koja djeluje na amortizere za vrijeme vožnje vozila u krug ne iščezne nego pokazuje male promjene iznosa što daje sugerirati da kotač trpi male vibracije, a ujedno i cijelo vozilo što je karakteristika koju je potrebno izbjeći.

Promatranjem dijagrama za stražnji kotač (Slika 54) moguće je učiti jednake karakteristike kao i za prednji kotač.



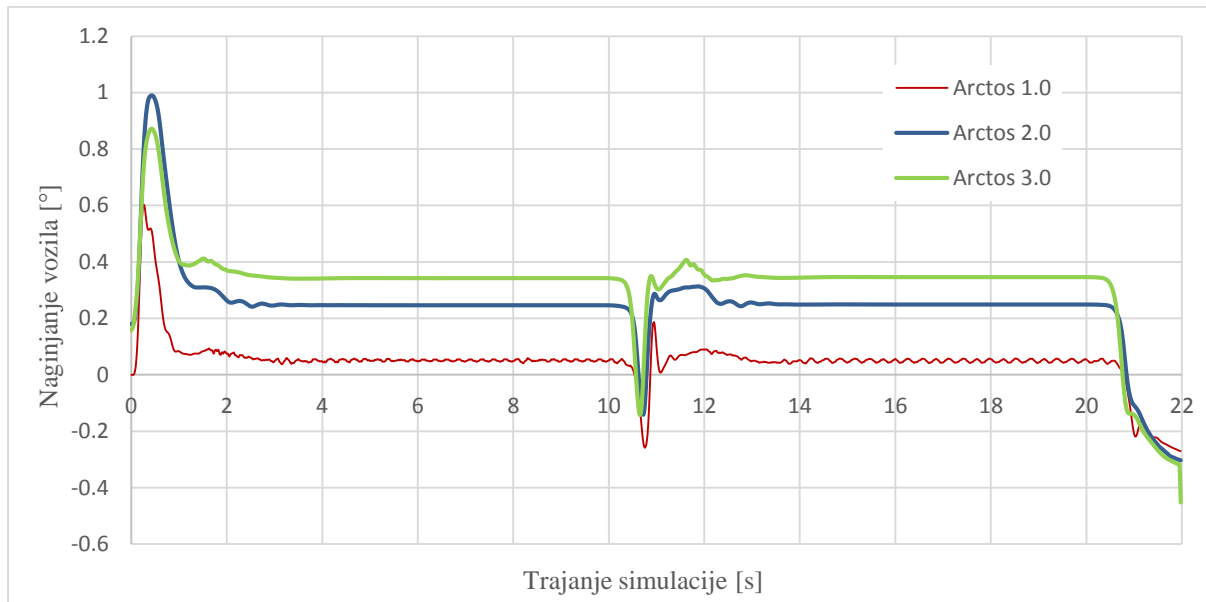
Slika 54. Djelovanje sile na stražnje amortizere prepravljenog i postojećeg modela

Zadavanjem agresivnosti vozača u programu CarSim određuje se maksimalno bočno ubrzanje prilikom ulaska vozila u zavoj. Postavke vozača jednaka su za sva tri slučaja. Utjecaj bočnog ubrzanja iznosa 1,4 g zadanog kao željeno bočno ubrzanje vozila može se vidjeti na slici 55. Ulaskom vozila u zavoj ostvaruje se znatno veće bočno ubrzanje, samo ubrzanje ovisi i o karakteristikama ovjesa, koje teži da se stabilizira na zadanih 1,4 g. Ukoliko staza ima dovoljno dugačak luk konstantnog radijusa, vozilo će u jednom trenutku postići brzinu koja odgovara željenom bočnom ubrzanju preko formule $a = v^2/r$. Kako je vidljivo sa slike 55. oba modela postignu željeno bočno ubrzanje od 1,4 g nakon što vozilo stabilizira prilikom ulaska u zavoj. Potrebno je uočiti da oba vozila prilikom ulaska u zavoj postignu veće vrijednosti bočnog ubrzanja od ciljanje (1,4 g), ali i povećane vibracije na postojećem modelu FSB Arctos 1.0.



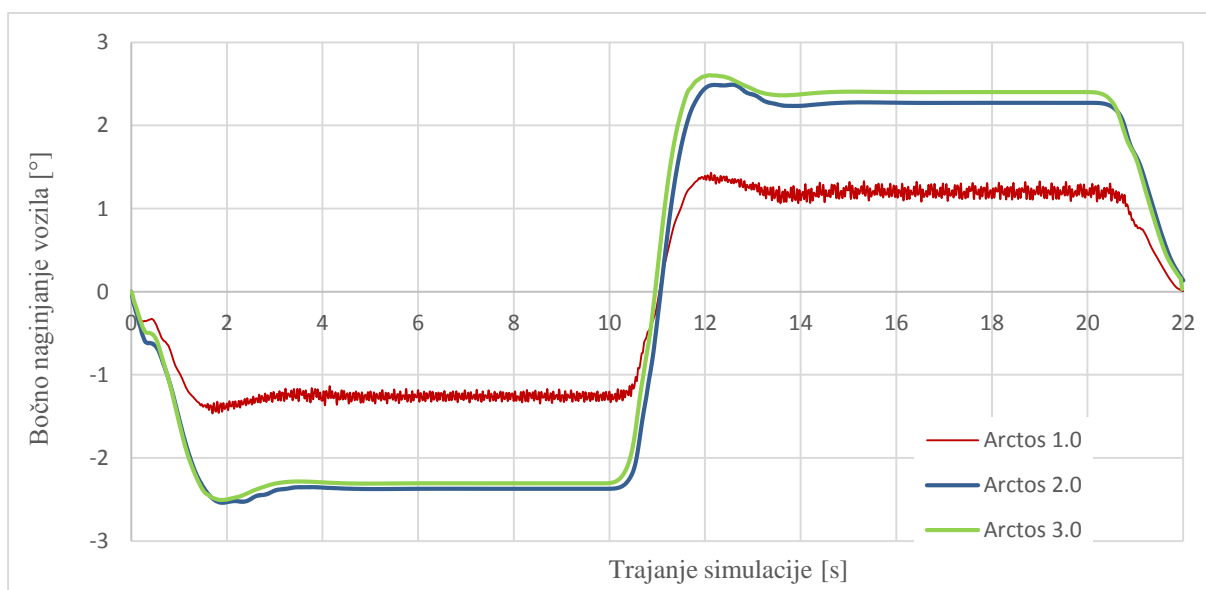
Slika 55. Bočno ubrzanje na ispitnoj stazi „osmice“

Niža vrijednost krutosti opruge na modelima Arctos 2.0 i Arctos 3.0 utjecala je na veće iznose uzdužna nagnjanja vozila. Stupanja poniranja i propinjanja vozila prikazan je na slici 56. Pozitivan predznak na dijagramu sa slike Slika 56. označava poniranje prednjeg kraja vozila. Iako je povećano poniranje vozila, određivanjem trenutnog centra rotacije u bočnom pogledu za prepravljenu konstrukciju vilica utvrđeno je da neće doći do kontakta prednjeg kraja vozila sa tlom ukoliko je poniranje manje od 2° .



Slika 56. Nagnjanje vozila oko poprečne osi (poniranje i propinjanje)

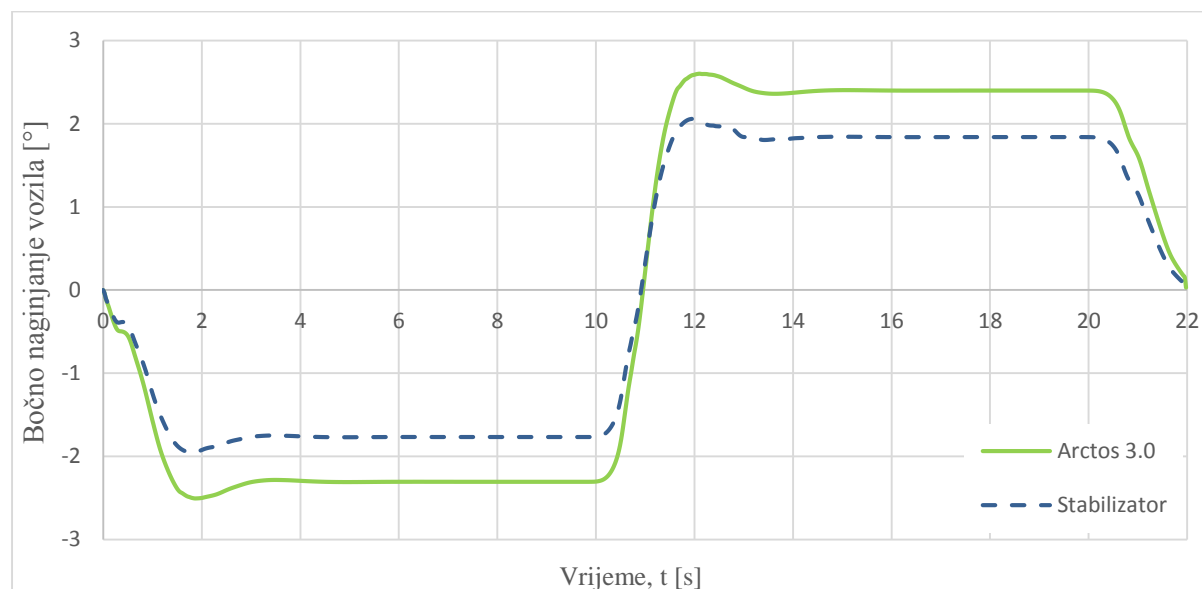
Bočno nagnjanje uvelike pridonosi stabilnosti vozila prilikom ulaska u zavoj. Na slici 57. prikazan je odnos bočnog nagnjanja postojećeg i prepravljenog modela FSB Arctos. Veći iznos bočnog nagnjanja prepravljenom modela uvelike ovisi o nižoj opružnoj karakteristici istog. Dobiveni gradijent bočnog nagnjanja za prepravljeno vozilo iznosi $1,22 \text{ deg/g}$, prema preporuci [1] za FSAE vozilo gradijent bočnog nagnjanja potrebno je dovesti na vrijednost između $0,8 - 1 \text{ deg/g}$. Željena vrijednost postiže se ugradnjom stabilizatora (engl. *anti roll bar*).



Slika 57. Bočno nagnjanje vozila

Iznosi bočnog nagnjanja sa slike 57. veći su na prepravljenim bolidima Arctos 2.0 i 3.0. Razlog povećanog iznosa je u ugradnji, po proračunu (76) i (77), konstante opruge manjeg iznosa od postojećih ugrađenih na bolid Arctos 1.0. Ukoliko se želi smanjiti iznos bočnog nagnjanja a da se pritom ne mijenjaju vrijednosti dobivenih konstanti opruga potrebno je ugraditi stabilizator (engl. anti roll bar).

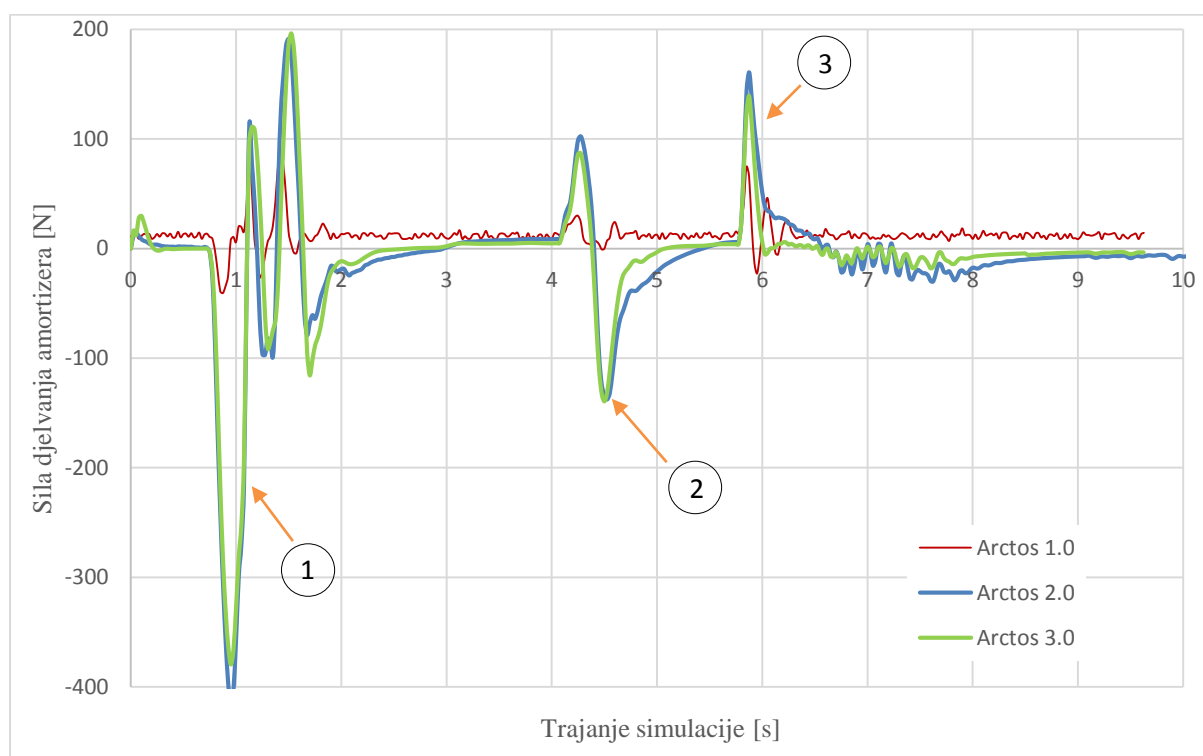
Ugradnjom stabilizatora prema izrazu (80) i (81) za ispitnu proceduru osmice postiglo se smanjenje bočnog nagnjanja za 23 % kako se može vidjeti na slici 58.



Slika 58. Usporedba bočnog nagnjanja za model Arcsto 3.0 sa i bez stabilizatora

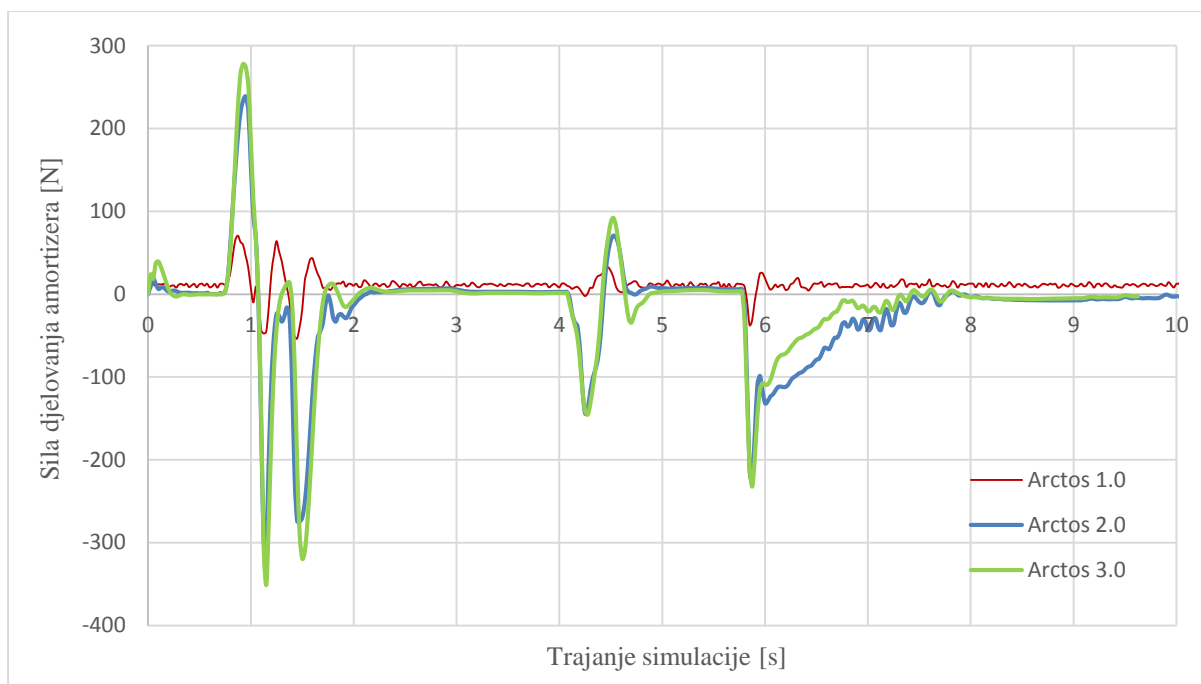
10.2. Simulacija ubrzanja i usporenja

Ispitna procedura ubrzanja od 0 – 100 km/h te naglim kočenjem do 0 km/h provedena je na oba modela. Na slici 59. prikazana je sila u amortizeru u ovisnosti o trajanju testiranja. Kako je vidljivo iz dijagrama na slici 59. sile koje djeluju na amortizer prepravljenog vozila veće su po apsolutnom iznosu. Pregledom dijagrama ističu se tri točke cijele ispitne procedure. Prva točka prikazuje djelovanje sila na amortizer prilikom pokretanja vozila te samim time amortizer prigušuje najveću silu cijelog ciklusa. Druga točka ispitnog ciklusa koja se pojavljuje između četvrte i pete sekunde ispitnog ciklusa predstavlja opterećenje izazvano promjenom stupnja prijenosa što utječe na naglu promjenu brzine vrtnje motora. Treća točka dijagrama predstavlja trenutak kada vozilo dostiže željenu brzinu od 100 km/h i počinje kočiti što utječe na prednje amortizere da prigušuju silu pozitivnog predznaka odnosno komprimiranje prednjih amortizera.



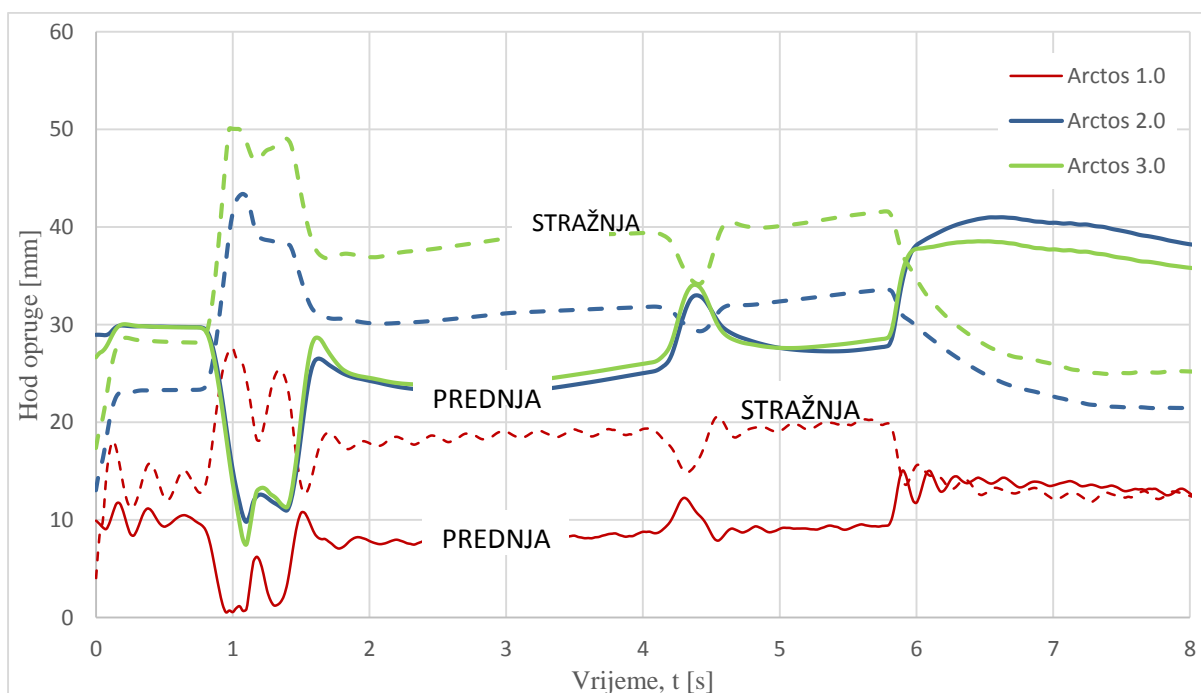
Slika 59. Sila djelovanja za prednji amortizer

Na dijagramu sa slike 58. vidljivo je da na stražnje amortizere u istom trenutku djeluju sile obrnutog predznaka što ukazuje da se stražnji amortizer prilikom pokretanja komprimira, a prednji ekstrudira.



Slika 60. Sila djelovanja za stražnji amortizer

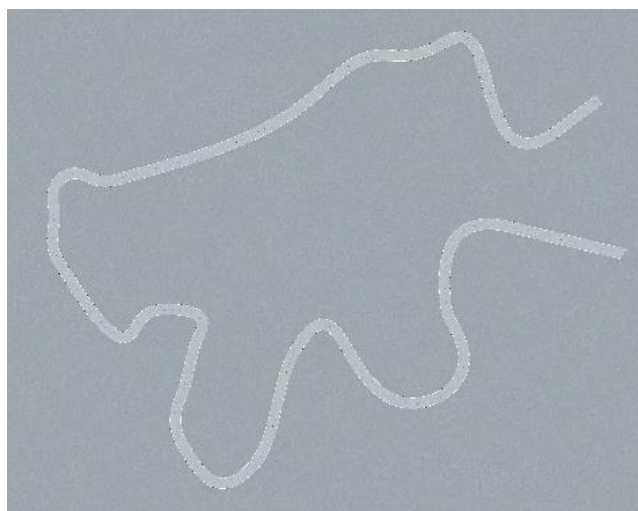
Prilikom izvršenja testa ubrzanja stražnje opruge se komprimiraju dok se u isto vrijeme prednje izdužuju. U trenutku kočenja vozilo počinje usporavati i opterećenje prelazi na prednje kotača i kreće komprimiranje prednjih opruga kako je prikazano na slici 61. Iz priloženog dijagrama može se vidjeti da najveće komprimiranje ima Arctos 3.0 te kao taka v najviše i ponire prilikom pokretanja vozila. Dodatnim zatezanjem opruge moguće je smanjiti poniranje zadnjeg kraja ukoliko je potrebno poboljšati karakteristike za ispitnu stazu ubrzanja i usporjenja.



Slika 61. Hod opruge za vrijeme testa ubrzanja i kočenja

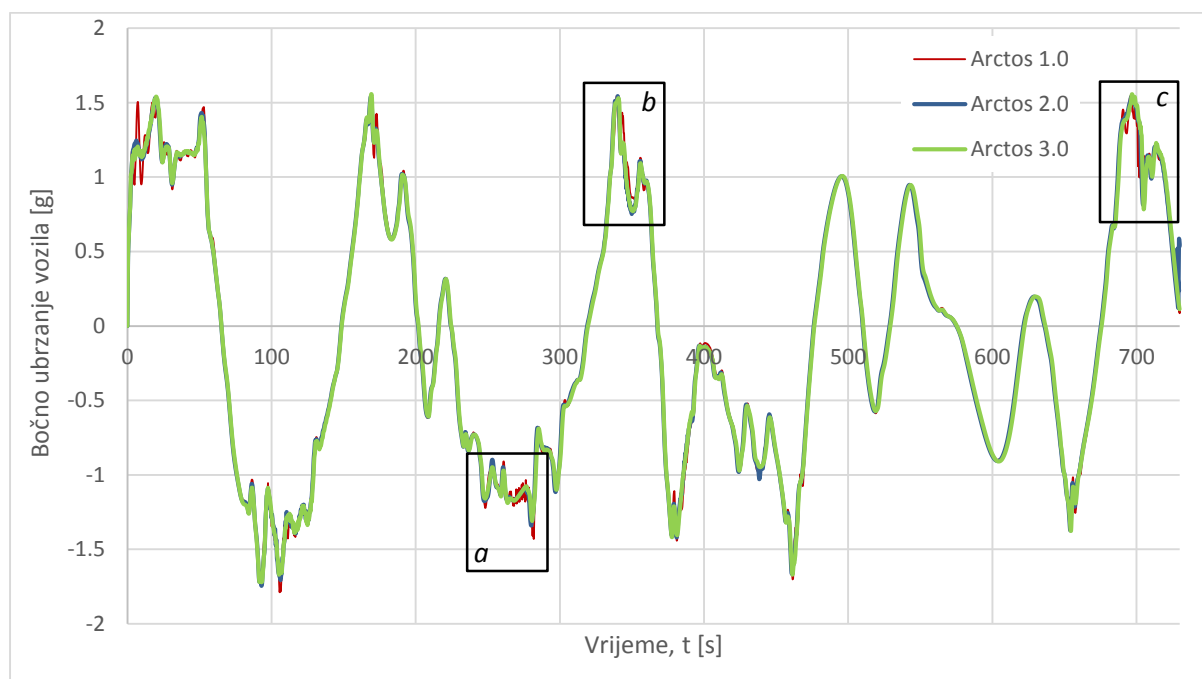
10.3. Ispitna staza Autokros

Autokros staza prikazana na slici 62. procedura je u kojoj vozila prolaze krug koji više sliči pravoj stazi nego ispitnom krugu.



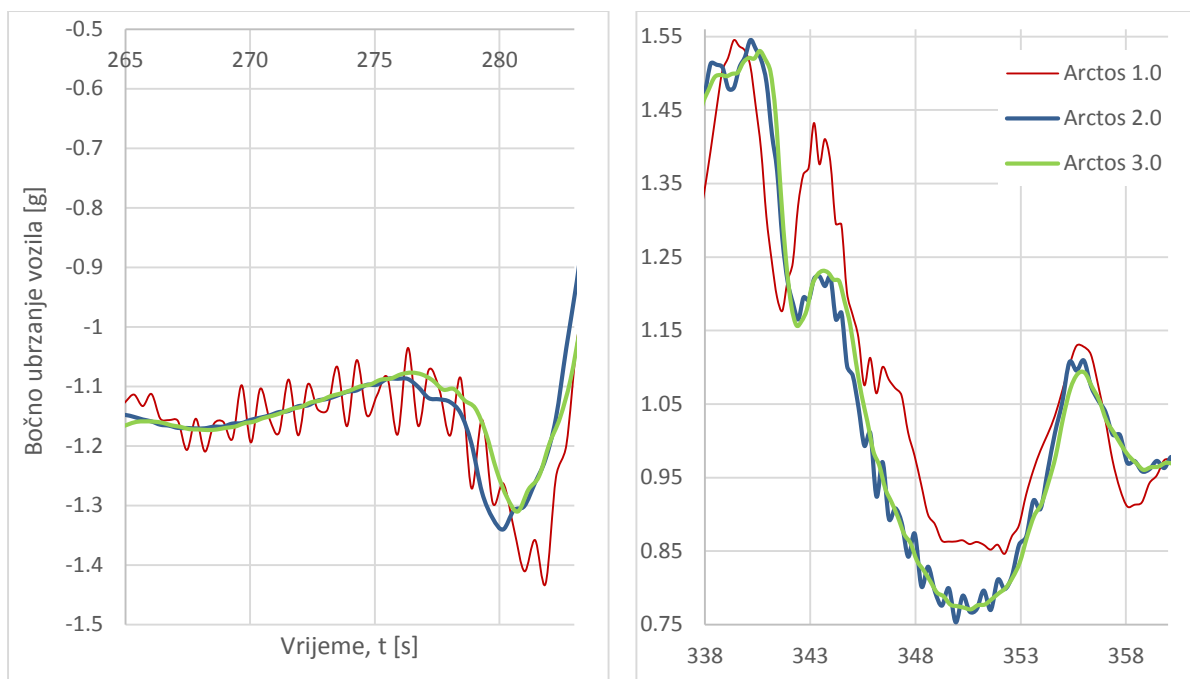
Slika 62. Autokros staza

Iznosi bočnog ubrzanja za sva tri vozila prikazana su na slici 63. Iako su iznosi bočnog ubrzanja slični potrebno je uvećati dijelove dijagrama označenih kvadratima a, b i c.

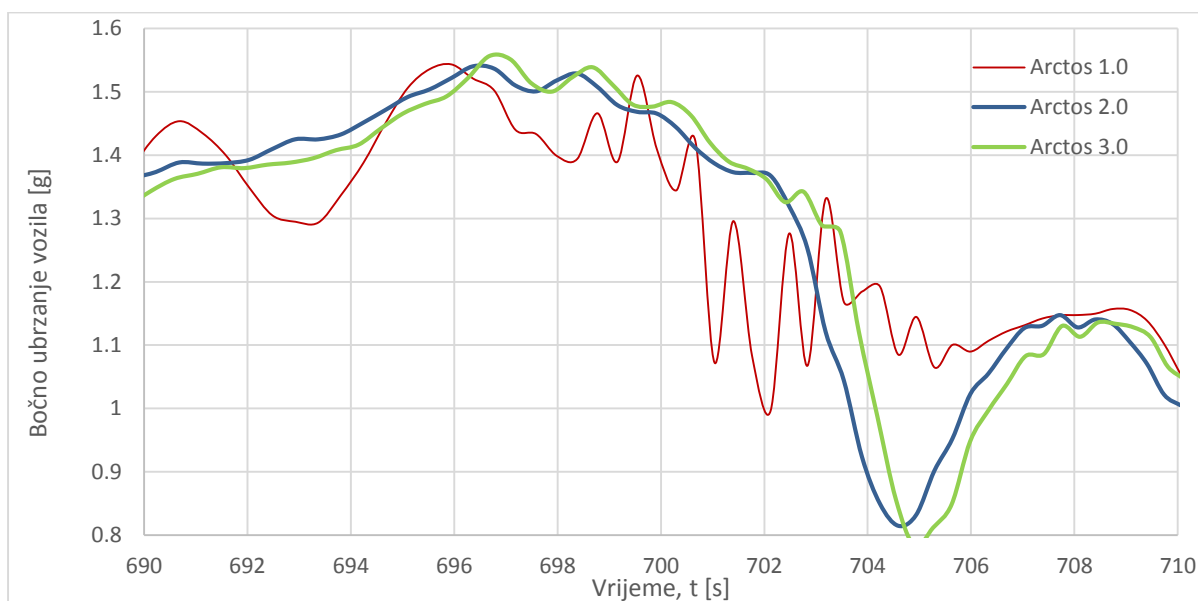


Slika 63. Bočno ubrzanje vozila za ispitnu proceduru autokros

Uvećani prikazi označeni kvadratima prikazani su na slikama 64. i 65. Kako se može vidjeti n navedenim slikama iznosi bočnog ubrzanja za Arctos 1.0 imaju krivulju sa izraženim vibracijama. Dodatne vibracije značajno utječu na ponašanje vozila na stazi kao i na konačni rezultat što se tiče vremena.

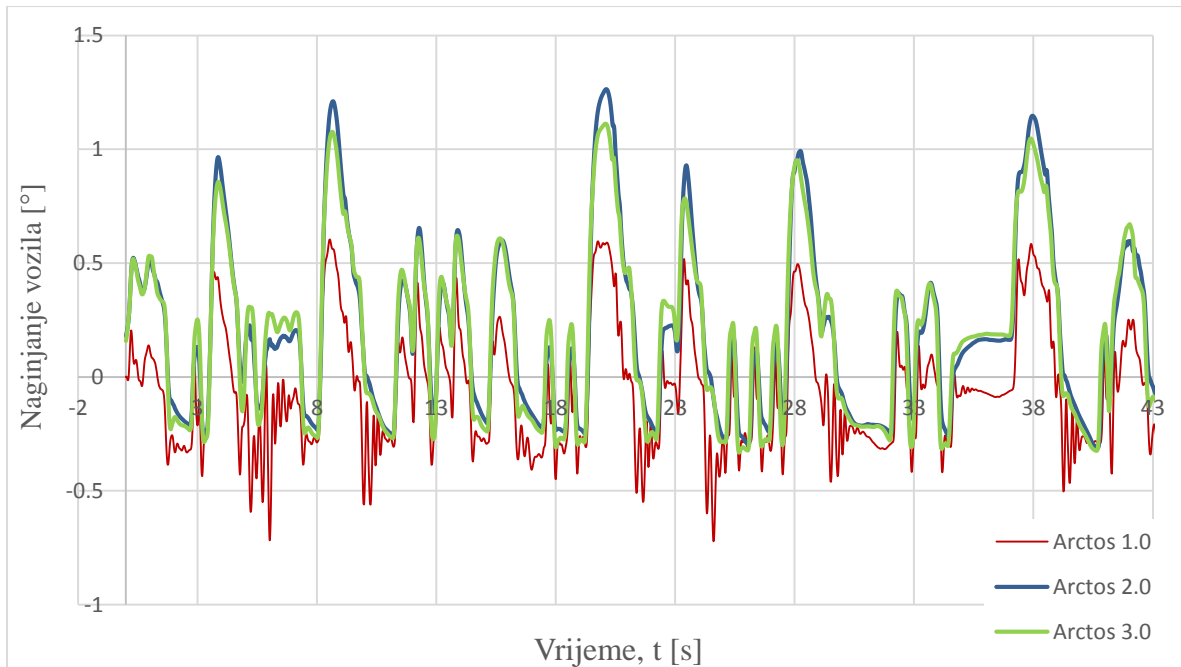


Slika 64. Uvećani prikaz bočnog ubrzanja prikazanih kvadratima „a“ (lijevo) i „b“ (desno) sa slike 63.



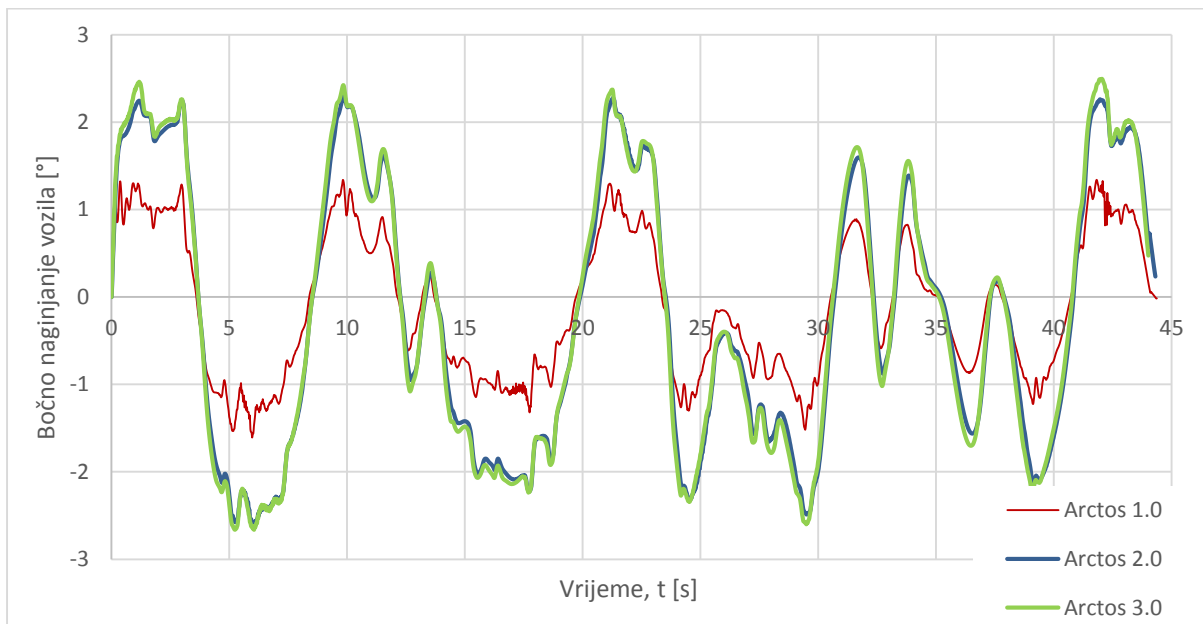
Slika 65. Uvećani prikaz bočnog ubrzanja prikazan kvadratom „c“ sa slike 63.

Naginje vozila oko poprečne osi (engl. *pitch*) prikazano je na slici 66. Kako je prikazano na dijagramu iznosi propinjanja i poniranja izraženiji su kod modela sa nižom („mekšom“) konstantom opruge Arctos 2.0 i 3.0. Izrazite vibracije modela Arctos 1.0 i ovdje su vidljive. Veći iznosi naginjanja mdela Arctos 2.0 od Arctos 3.0 su posljedica konstrukcije ovjesa i njegovih anti-značajki [8].



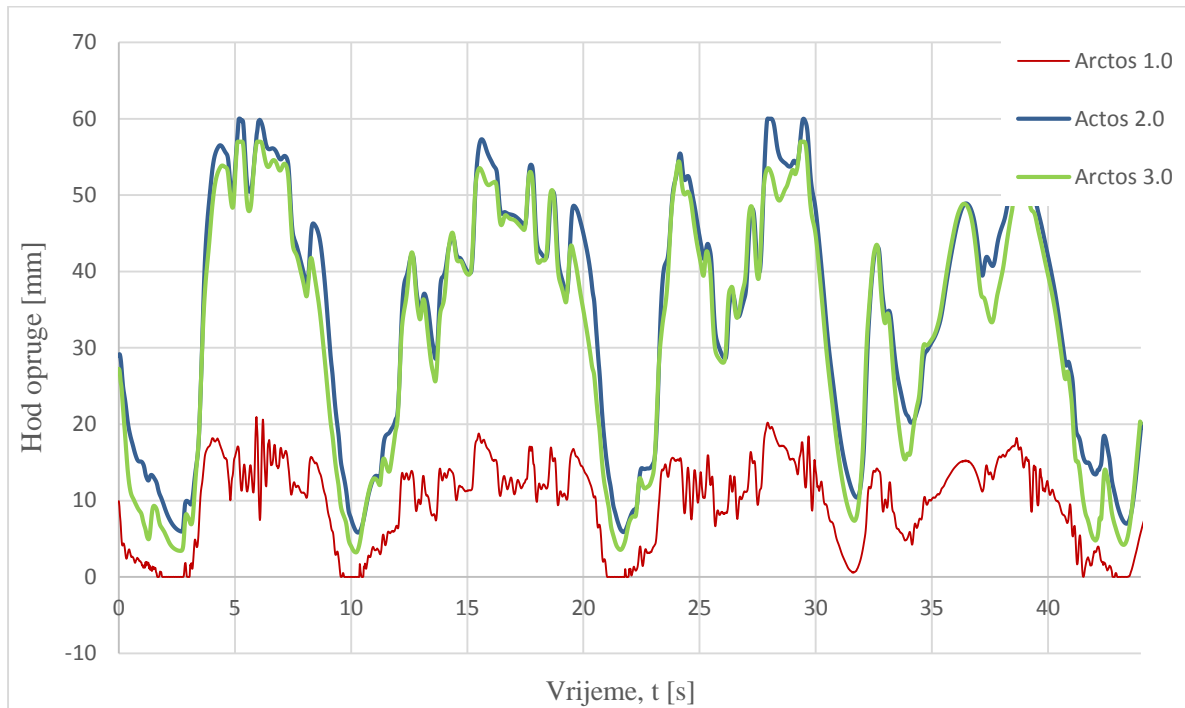
Slika 66. Naginjanje vozila oko poprečne osi (poniranje i propinjanje) (engl. *pitch*)

Bočno naginjanje vozila pokazuje slične karakteristike kao i kod ispitna staze osmice. Dodatna ugradnja stabilizatora smanjila bi iznose bočnog naginjanja.



Slika 67. Bočno naginjanje vozila

Hod opruge prikazan na slici 68. definiran je tako da u nultoj sekundi opruge budu komprimirane za iznos koji odgovara djelovanju samo težine vozila. Karakteristika opruge mora biti tako određena tako da onemogući potpuno izvlačenje ili sabijanje amortizera. Granice amortizera zadaju se u programu CarSim i za ovaj slučaj iznose od 0 mm do 60 mm hoda opruge. Kako se može vidjeti iz priloženih dijagrama modeli Arctos 2.0 i 3.0 sabijaju oprugu za iznos od 30 mm te se hod opruge kreće u zadanim granicama kroz cijeli ispitni krug. Nepoželjna karakteristika vidljiva je na modelu Arctos 1.0 u trenutku kada hod opruge iznosi nula (trenutak potpunog izvlačenja amortizera i odvajanja kotača od podloge).



Slika 68. Hod opruge za ispitnu proceduru autokros

11. Zaključak

U ovom radu prikazan je utjecaja opruge, amortizera kao i sveukupne konstrukcije ovjesa na dinamičke karakteristike bolida FSB Arctos. Dimenzije poluga (engl. *rocker*) kako je prikazano direktno utječu na karakteristiku amortizera i opruge u ravnini kotača što daje mogućnost podešavanja same karakteristike podešavanjem poluge. Iako je navedeni način konstruiranja ovjesa moguć u konstrukciji se pokušava utjecati na karakteristiku prigušivanja odabirom odgovarajućeg amortizera.

Dobiveni rezultati izvršenih simulacija za postojeće vozilo FSB Arctos 1.0 uspoređeno je sa rezultatima za vozilo jednake konstrukcije ovjesa, ali različite opružno prigušne karakteristike (Arctos 2.0) kao i sa vozilom potpuno izmijenjene konstrukcije ovjesa i opružno prigušne karakteristike (Arctos 3.0). Dobiveni rezultati pokazuju da su prepravljeni modeli Arctos 2.0 i 3.0 postigli bolja vremena testiranjem ispitne procedure autokros i osmice. Glave prednosti uočene kod modela Arctos 2.0 i 3.0 su manje vertikalne vibracije vanjskih kotača te samim time i mirniji prolazak vozila kroz zavoj. Dijagrami dinamičnih karakteristika za ispitana vozila na proceduri osmice jasno pokazuju nepoželjne vibracije vozila Arctos 1.0. Smanjenjem krutosti opruge na modelima Arctos 2.0 i 3.0 utjecalo je na povećanje iznosa bočnog naginjanja kao i naginjanja vozila oko poprečne osi (poniranje propinjanje). Sami iznosi naginjanja su u preporučenim granicama te ih je moguće smanjiti ugradnjom stabilizatora. Iako su dobivene karakteristike za modele Arctos 2.0 i 3.0 slične, prednost modela sa prepravljenom geometrijom vidljiva je na procedurama autokros-a i osmice preko ostvarenog vremena u korist modela Arctos 3.0.

12. Literatura

- [1] Milliken W. F. i Douglas L. M., Race Car Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pa., 1995.
- [2] Dixon, J.C., The Shock Absorber Handbook, John Wiley & Sons The Open University, UK; 2007.
- [3] Christop Woernle, Manuskript zur Vorlesung, Fahrmechanik, Universität Rostock, 2005.
- [4] Karakteristike amortizera, <http://www.dnms shock.com/>, pristupljeno 15.03.2014.
- [5] Prijedlozi za izradu amortizera, <http://www.kaztechnologies.com/formula-sae/fsae-information-center/>, pristupljeno 15.03.2014.
- [6] Karakteristike pneumatika Avon FSAE, <http://www.avonmotorsport.com/resource-centre/downloads>, pristupljeno 15.03.2014.
- [7] Prijedlozi za izradu amortizera, http://www.optimumg.com/docs/Springs&Dampers_Tech_Tip_1.pdf, pristupljeno 15.03.2014.
- [8] Perković I., Diplomski rad: Određivanje i analiza geometrijskih karakteristika ovjesa bolida Formula Student, FSB Zagreb, 2014.
- [9] SAE INTERNATIONAL, FSAE 2014 rules; <https://www.sae.org/>, pristupljeno 15.03.2014.
- [10] CarSIM reference guide, Mechanical Simulation Corporation, 2006.

PRILOG

- I. Tablice promjene geometrijskih značajki
- II. CD-R

Tablice promjene geometrijskih značajki

ARCTOS 1.0 Prednji

ARCTOS 1.0 Stražnji

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Usmjereno st kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovi nskog razmaka (mm)	Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Usmjereno st kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovi nskog razmaka (mm)
0	11,982	-0,1377	47,237	-12,21	0,03	0	13,418	0,0744	0,0019	-11,13	0,02
2,5	10,973	-0,1293	47,221	-11,09	0,03	2,5	12,286	0,068	0,0018	-10,1	0,01
5	0,9966	-0,1204	47,205	-9,99	0,03	5	11,157	0,0616	0,0016	-9,08	0,01
7,5	0,8961	-0,1109	4,719	-8,91	0,03	7,5	10,031	0,0553	0,0015	-8,09	0,01
10	0,7959	-0,1008	47,174	-7,84	0,03	10	0,8907	0,049	0,0013	-7,11	0,01
12,5	0,6958	-0,0901	47,159	-6,8	0,03	12,5	0,7787	0,0428	0,0011	-6,16	0,01
15	0,5959	-0,0789	47,144	-5,77	0,03	15	0,6668	0,0366	0,001	-5,22	0,01
17,5	0,4963	-0,0671	47,129	-4,76	0,02	17,5	0,5552	0,0304	0,0008	-4,3	0,01
20	0,3967	-0,0548	47,114	-3,77	0,02	20	0,4438	0,0243	0,0006	-3,4	0,01
22,5	0,2973	-0,0419	47,099	-2,8	0,02	22,5	0,3326	0,0181	0,0005	-2,53	0,01
25	0,1981	-0,0285	47,085	-1,85	0,01	25	0,2215	0,0121	0,0003	-1,66	0
27,5	0,099	-0,0145	4,707	-0,92	0,01	27,5	0,1107	0,006	0,0002	-0,82	0
30	0	0	47,056	0	0	30	0	0	0	0	0
32,5	-0,0989	0,0151	47,042	0,9	-0,01	32,5	-0,1105	-0,006	-0,0002	0,8	0
35	-0,1977	0,0306	47,028	1,78	-0,01	35	-0,221	-0,0119	-0,0003	1,59	0
37,5	-0,2964	0,0468	47,014	2,64	-0,02	37,5	-0,3312	-0,0179	-0,0005	2,36	-0,01
40	-0,395	0,0634	47,001	3,49	-0,03	40	-0,4414	-0,0238	-0,0006	3,11	-0,01
42,5	-0,4935	0,0806	46,987	4,32	-0,04	42,5	-0,5515	-0,0297	-0,0008	3,84	-0,01
45	-0,592	0,0984	46,974	5,13	-0,05	45	-0,6615	-0,0355	-0,001	4,56	-0,01
47,5	-0,6905	0,1166	46,961	5,92	-0,06	47,5	-0,7714	-0,0414	-0,0011	5,25	-0,02
50	-0,7889	0,1354	46,948	6,7	-0,07	50	-0,8813	-0,0472	-0,0013	5,93	-0,02
52,5	-0,8872	0,1547	46,935	7,46	-0,08	52,5	-0,9911	-0,053	-0,0014	6,59	-0,02
55	-0,9856	0,1746	46,922	8,2	-0,1	55	-11,008	-0,0587	-0,0016	7,24	-0,02
57,5	-10,839	0,1949	4,691	8,93	-0,11	57,5	-12,106	-0,0645	-0,0017	7,86	-0,03
60	-11,823	0,2158	46,897	9,64	-0,12	60	-13,203	-0,0702	-0,0019	8,47	-0,03

ARCTOS 3.0 Prednji

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Usmjereno st kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosov inskog razmaka (mm)	Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Usmjereno st kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosov inskog razmaka (mm)
0	0,008	-0,0352	86,014	0	0	0	0,675	-0,0384	-11,377	-5,37	-1,57
2,5	0,2057	-13,122	8,704	-4,16	-0,78	2,5	0,6196	-0,0345	-11,434	-4,82	-1,44
5	0,1895	-11,866	86,944	-3,71	-0,72	5	0,5641	-0,0307	-11,491	-4,3	-1,31
7,5	0,1728	-10,625	86,848	-3,27	-0,65	7,5	0,5085	-0,0271	-11,548	-3,79	-1,18
10	0,1556	-0,9396	86,753	-2,85	-0,58	10	0,4527	-0,0236	-11,605	-3,3	-1,05
12,5	0,1379	-0,818	86,657	-2,44	-0,51	12,5	0,3967	-0,0202	-11,663	-2,82	-0,92
15	0,1197	-0,6976	86,562	-2,04	-0,44	15	0,3406	-0,017	-1,172	-2,37	-0,78
17,5	0,101	-0,5785	86,467	-1,67	-0,37	17,5	0,2843	-0,0139	-11,777	-1,93	-0,65
20	0,0818	-0,4606	86,372	-1,3	-0,29	20	0,2278	-0,0108	-11,835	-1,51	-0,52
22,5	0,0621	-0,3438	86,278	-0,95	-0,22	22,5	0,1711	-0,008	-11,892	-1,11	-0,39
25	0,0419	-0,2281	86,183	-0,62	-0,15	25	0,1143	-0,0052	-1,195	-0,72	-0,26
27,5	0,0212	-0,1135	86,089	-0,3	-0,07	27,5	0,0573	-0,0025	-12,007	-0,35	-0,13
30	0	0	85,995	0	0	30	0	0	-12,065	0	0
32,5	-0,0217	0,1125	85,901	0,29	0,07	32,5	-0,0575	0,0024	-12,123	0,33	0,13
35	-0,0438	0,2239	85,807	0,56	0,15	35	-0,1151	0,0047	-12,181	0,65	0,26
37,5	-0,0664	0,3344	85,713	0,82	0,22	37,5	-0,1731	0,0069	-12,238	0,95	0,39
40	-0,0896	0,4439	8,562	1,07	0,3	40	-0,2312	0,009	-12,296	1,23	0,52
42,5	-0,1132	0,5525	85,527	1,29	0,38	42,5	-0,2896	0,0109	-12,354	1,5	0,65
45	-0,1372	0,6602	85,433	1,51	0,45	45	-0,3482	0,0128	-12,412	1,75	0,78
47,5	-0,1618	0,7669	8,534	1,71	0,53	47,5	-0,4071	0,0145	-1,247	1,98	0,91
50	-0,1869	0,8728	85,248	1,89	0,61	50	-0,4662	0,0161	-12,529	2,2	1,04
52,5	-0,2124	0,9779	85,155	2,07	0,68	52,5	-0,5256	0,0176	-12,587	2,39	1,17
55	-0,2384	10,821	85,063	2,22	0,76	55	-0,5853	0,019	-12,645	2,58	1,3
57,5	-0,2649	11,855	84,971	2,36	0,84	57,5	-0,6453	0,0202	-12,703	2,74	1,43
60	-0,2919	12,881	84,879	2,49	0,91	60	-0,7056	0,0214	-12,762	2,89	1,56